8 Zukunftsaspekte des Fahrwerks

Mit steigendem Wohlstand und Lebensstandard in unserer Gesellschaft wächst auch der Anspruch nach mehr Komfort und Lebensfreude auf der einen sowie das Bedürfnis nach mehr Schutz und Sicherheit auf der anderen Seite. Dies erstreckt sich auf alle Gebiete unseres täglichen Lebens. Bezogen auf das Automobil als unverzichtbarer Bestandteil unserer individuellen Mobilität haben diese Bedürfnisse die Fahrzeugentwicklung auch in den Bereichen Fahrwerk und Fahrzeugregelsysteme geprägt. Ziel der Fahrzeugregelsysteme ist es, für den Fahrer schwer zu kontrollierende, nichtlineare und verkoppelte Vorgänge beherrschbar zu machen und so die Sicherheit zu erhöhen. Die Fahrwerke selbst sollen den Kundenwunsch durch ihre Eigenschaften Agilität, Fahrdynamik, Komfort und Sicherheit erfüllen helfen.

Durch die Weiterentwicklung der Fahrwerkselemente und durch ein immer besseres und tieferes Verständnis der Fahrzeug- und Zuliefererindustrie für das komplexe Zusammenwirken dieser Komponenten konnten gerade in den letzten zwei Jahrzehnten große Fortschritte in der Qualität und den Eigenschaften von Fahrwerken erzielt werden. Dazu trugen aber auch immer leistungsfähigere Entwicklungsinstrumente, Materialien und Herstellverfahren bei. Obwohl aus Kostengründen auch heute noch die meisten Fahrwerke konventioneller Natur, d.h., aus passiven Komponenten aufgebaut sind, darf von einem hohen erreichten Niveau „mechanischer Intelligenz" gesprochen werden.

Eine der großen Herausforderungen ist es, diesen systemübergreifenden Kenntnisstand über kausale Zusammenhänge zusammen mit leistungsfähigen Rechnern und Programmen zur Verbesserung des virtuellen Entwicklungsprozesses zu nutzen. Auch die intensive Einbeziehung anderer Wissenschaftszweige wie der Psychologie in den Prozess bietet Möglichkeiten zur Verbesserung des Kundennutzens.

Eine technische Revolution auf dem Fahrwerkssektor ist durch den Einsatz leistungsfähiger, vernetzter Fahrwerkregelsysteme abzusehen. Dabei spielt das Thema der zeitlichen und räumlichen Vorausschau für Fahrspurführung und Fahrbahnunebenheiten eine große Rolle. Dieses hohe mechanische Ausgangsniveau bleibt dennoch die unverzichtbare Basis der Fahrwerksabstimmung, auch wenn unter den neuen technischen Randbedingungen der Kompromisszwang für die konventionellen, passiven Teile des Fahrwerks gegenüber heute reduziert sein wird.

Das aktuelle Thema der CO_2-Reduzierung wird, wenn auch nicht gravierend, das Fahrwerk der künftigen Modelle beeinflussen und den in letzter Zeit vernachlässigten Leichtbau wiederbeleben.

8.1 Fahrwerkkonzepte – Fokussierung auf den Kundenwert

8.1.1 Auslegung des Fahrverhaltens

Basis des folgenden Abschnitts ist eine Expertenbefragung des Lehrstuhls für Fahrzeugtechnik der TU München in Zusammenarbeit mit einem Verhaltensforscher. Es wurden 12 Experten aus den Bereichen Fahrwerkstechnik, Kundenwerte und Subjektivbeurteilung von Fahrzeugen befragt. Die wichtigsten Erkenntnisse werden nachfolgend zusammengefasst.

Die von einem Fahrzeug vermittelten gesellschaftlichen Werte werden immer deutlicher zur Kaufentscheidung herangezogen, während relativ dazu die Funktion an Bedeutung verliert. Produkte können noch so hoch in ihrer Qualität und angemessen in der Preisgestaltung sein – nur wenn es ihnen gelingt, die Aufmerksamkeit der Konsumenten zu erregen und als wünschenswert, nützlich und emotional befriedigend betrachtet zu werden, sind sie erfolgreich.

Das Ansprechen von tief sitzenden Emotionen und Werthaltungen wird erfolgreich eingesetzt, um Kunden zu gewinnen. Durch eine möglichst zutreffende Planung der Produktidentität und der Zielgruppe können die für diese Gruppe relevanten Wertvorstellungen erarbeitet werden. In **Bild 8-1** ist dargestellt, wie die Experten das für die Kaufentscheidung relevante Wertgefüge beispielhaft für das Jahr 2008 einschätzen und wie die Entwicklung der Werte vom Zeitpunkt der Befragung (2004) aus verlaufen wird.

Ausgehend von diesen Werthaltungen muss eine transparente Logik hin zu den für den Entwickler bestimmenden technischen Kriterien und Lösungen gefunden werden. Der bei den OEM zunehmend verwendete Ansatz der Ausrichtung an kundenwerten Eigenschaften muss daher um den Aspekt der gesellschaftlichen Werthaltungen erweitert werden [1].

Fahrdynamische Eigenschaften waren stets ein wichtiges Differenzierungs- und Kaufentscheidungskriterium für Fahrzeuge in allen Segmenten. Von neuen Fahrwerkskonzepten wird nicht nur ein höheres Potential an Sicherheit, sondern auch eine verbesserte Fahrdynamik und höherer Fahrkomfort erwartet. Mit diesen Eigenschaften wird heute aber nicht mehr nur technische Kompetenz nachgewiesen, sondern es werden eben auch zunehmend subjektiv geprägte Werte vermittelt. Die Fahrdynamik mit ihrer stark subjektiv geprägten Wahrnehmung einerseits und ihrem komplexen technischen Anforderungsprofil andererseits erfordert deshalb besonders eine geeignete Methode zur Ableitung von Zielbereichen für die technische Entwicklung.

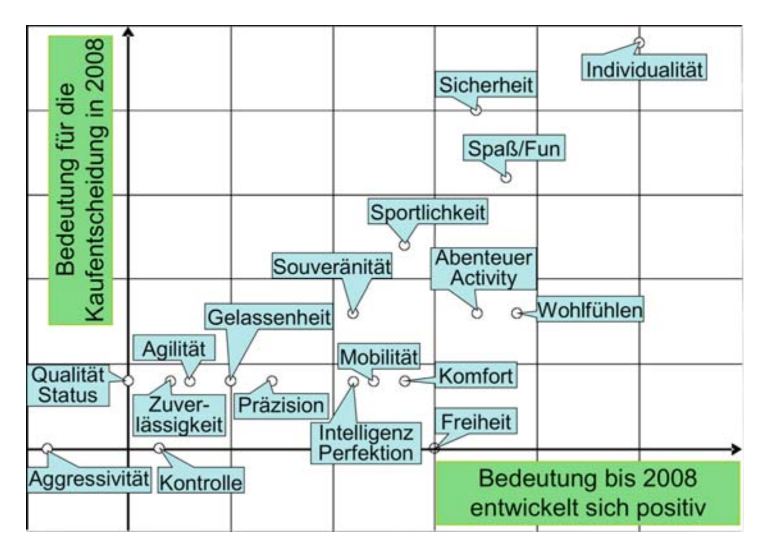


Bild 8-1: Kaufentscheidende Werthaltungen bis 2008 in der Mittelklasse, Einschätzung der Experten

Für die einzelnen Bereiche aus **Bild 8-2** sind subjektive und objektive Beurteilungsmethoden etabliert, wobei es zur Erreichung größerer Sicherheit im Prozess das Ziel ist, alle Bereiche zunehmend der objektiven Beurteilung zugänglich zu machen. Die Verknüpfung der Ebenen ist aber nicht durch Methoden abgedeckt. Da der Zusammenhang stark vom Zusammenspiel der im Fahrzeug verwendeten Einzellösungen und vom Fahrzeugkonzept abhängig ist, kann er nur durch Experten für einen Teilbereich hergestellt werden. Die Zusammenhänge müssen für jedes Fahrzeug neu validiert werden, da sich diese mit wechselnden Technologien über der Zeit verändern. Diese herstellerspezifische Abhängigkeit macht den Ansatz wertvoll, weil mit ihm – bei Verwendung geeigneter Rohdaten – der Beitrag einzelner Technologien zur Produktpersönlichkeit nachvollzogen werden kann. Der Ansatz der Methode ist es, diese Beziehungen durch Expertenwissen herzustellen.

Dazu ist es zunächst von Interesse, wie sich der Einfluss wertorientierter Eigenschaften auf die Kaufentscheidung bis zum Zielzeitraum entwickeln wird, und welche Werte dem Kunden zukünftig bestimmte Fahrdynamikeigenschaften vermitteln. Im nächsten Schritt finden diese Werte Eingang in die Spezifikation der Gesamtfahrzeugeigenschaften. Aufbauend auf Expertenwissen wird hinterfragt, wie durch die Ausprägung der fahrdynamischen Merkmale die priorisierte Gesamtfahrzeugeigenschaften gefördert werden können. Als letzter und für die Entscheidung wesentlichster Schritt, kann dann der Beitrag einer Technologie zur Verbesserung der betreffenden Fahrdynamikeigenschaften ermittelt werden. Die Experten müssen dazu in der Lage sein, den Zusammenhang zwischen Wert und Technik im Bereich des Fahrwerks herzustellen.

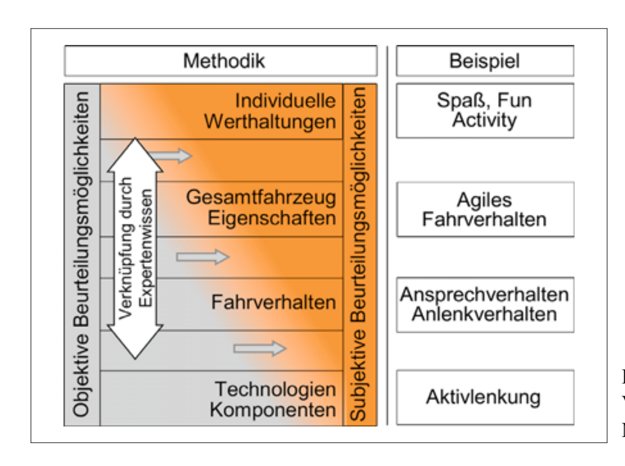


Bild 8-2: Vom Kundenwert zur Fahrwerkstechnik, Methode und Beispiel

Die Methode erlaubt es, aus einem Profil gesellschaftlicher Werte ein Profil der dafür förderlichen Fahrdynamikeigenschaften abzuleiten und kann daher zum einen im Bereich der Vorentwicklung die Entscheidung über neue Technologien auf eine nachvollziehbare Basis stellen. Zum anderen ist die Rückverfolgbarkeit von Änderungen an der Fahrdynamik auf die kundenrelevanten Eigenschaften und die Wertvermittlung ein Werkzeug, um in der Serienentwicklung Zielkonflikte rational und nachvollziehbar lösen zu können.

8.1.2 Diversifizierung der Fahrzeugkonzepte – Stabilisierung der Fahrwerkskonzepte

Der Trend zu Individualisierung betrifft neben der Gestaltung des Innenraums auch die Konzipierung des Gesamtfahrzeugs. Die Nachfrage nach neuen, den individuellen Bedürfnissen der Endkunden angepassten Fahrzeugkonzepten wird zuerst von einer breit aufgestellten OEM befördert und zwingt andere Hersteller dazu, diese Nischen ebenfalls zu bedienen. Eine Diversifizierung des Fahrzeugmarktes ist die Folge.

Der Diversifizierung der Fahrzeugkonzepte steht eine Stabilisierung der verwendeten Fahrwerkskonzepte gegenüber. Dies kann darauf zurückgeführt werden, dass die Bedeutung des mechanischen Anteils des Fahrwerks als Differenzierungsmerkmal auf Grund der hohen Ausreifung und der resultierenden Performance bereits eine Sättigung erreicht hat. Ein Großteil der Differenzierung im Bereich zukünftiger Fahrwerke wird besonders im Bereich kleiner und mittlerer Pkws über die Verwendung elektronischer Assistenzsysteme erfolgen. Die Anzahl der unterschiedlichen Achs- und Lenkungskonzepte wird sich stark verringern.

Schon im Jahr 2004 wurde bei fast 100% aller Fahrzeuge der Klein-, Kompakt- und Van-Klasse eine McPherson-Federbein-Vorderachse verbaut. Bei den Hinterachsen werden zum gleichen Zeitpunkt bereits bei ca. 75% der Klein- und 40% der Kompaktklasse Verbundlenkerachsen verbaut. Hier ist eine weitere Verbreitung abzusehen. Davon abweichende Lösungen werden zumeist nur aus Gründen der Markenidentität (z.B. Luftfederung Citroen) beibehalten.

Die Schwierigkeiten, eine Differenzierung vom Wettbewerb durch aufwändigere Lösungen, z.B. in der Kompaktklasse zu erreichen, zeigen den hohen Reifegrad der Verbundlenkerlösungen. Die Standardlösung aus McPherson vorn und Verbundlenker hinten, ist mit den korrespondierenden Fahrzeuggewichten und -abmessungen in der Lage, für fast den gesamten fahrdynamischen Bereich ein sehr gutes Fahrverhalten zu gewährleisten.

Von der Mittelklasse an aufwärts scheint die Verwendung von Mehrlenker-Hinterachsen zum Standard zu werden (ca. 70 bis 90% der Fahrzeuge). Bis zum Jahr 2010 ist eine weitere Verbreitung abzusehen. Für die Vorderachse werden vorrangig Doppel-Querlenker- und Mehrlenkersysteme verbaut.

Differenzierungsfähige Innovationen mit teuren elektromechanischen Komponenten, wie z.B. aktive Stabilisatoren oder Überlagerungslenkungen, etablieren sich in der Regel zunächst im Premiumsegment und werden erst bei entsprechender Marktdurchdringung und damit verbundener möglicher Kostensenkung in die niedrigeren Klassen eingeführt. Voraussetzung dafür ist die Generierung eines für diese Klassen relevanten Kundennutzens. Obwohl entwicklungsintensive Innovationen vielfach vorrangig der Stärkung des Markenprofils dienen, kann dies nicht immer den Erfolg garantieren. Ausnahmen hiervon bilden mechanisch-elektrisch-elektronische Innovationen in den kostensensitiven Marktsegmenten, die auf eine Reduktion der Herstellkosten oder der Betriebskosten durch Verbrauchsverringerung abzielen (z.B. elektromechanische Lenkung).

Bei den Fahrzeugklassen Sportwagen und SUV/ Geländewagen können auf Grund des speziellen Anforderungsprofils die o.g. Trends nicht ohne weiteres transferiert werden.

Die folgenden Übersichten über die im Bereich der Fahrwerke verwendeten Lösungen beruhen auf einer umfangreichen Recherche der im Jahr 2004 im Markt befindlichen Automobile. Aus den gängigen Fahrzeugklassen Kleinwagen, Kompaktklasse, Mittelklasse, obere Mittelklasse, Sportwagen, Großraumlimousinen/Vans wurden jeweils 7 Fahrzeuge ausgewählt und auf ihre Fahrwerkskomponenten hin untersucht.

8.1.2.1 Vorderachsen, Stand 2004

Bei den in 2004 verbauten Achssystemen der Vorderachse zeigt sich eine deutliche Konzentration auf die drei Achskonzepte Mehrlenker, Doppel-Querlenker und McPherson-Achsen, wobei letztere eine klar beherrschende Stellung vor allem in den leichteren und preissensitiveren Marktsegmenten einnimmt. Mit Ausnahme der Oberklasse und bei Sport- und Geländewagen ist die McPherson-Aufhängung das vorwiegend verwendete Vorderachskonzept. In der oberen Mittelklasse werden zu 50% Mehrlenkerachsen und vor allem im niedrigeren Preissegment zu 50% McPherson verbaut (**Tabelle 8-1**). Das große Potenzial der McPherson-Aufhängung an der Vorderachse zeigt sich in der Verwendung in Fahrzeugen der oberen Mittelklasse und sogar der Oberklasse bei nicht angetriebenen Achsen.

Es ist in den nächsten Jahren nicht mit einer wesentlichen Verschiebung der beschriebenen Verhältnisse zu rechnen. Die McPherson-Aufhängungen können wegen der gestiegenen Anforderungen an den Fahrkomfort ggf. mit einer aufgelösten unteren Lenkerebene konstruiert werden. Obwohl der Anteil an

Doppelquerlenkaufhängungen mit der Abnahme von allradgetriebenen Fahrzeugen insgesamt zurückgegangen ist, steigt der Anteil der nicht angetriebenen Vorderachsen in Doppelquerlenkerausführung.

8.1.2.2 Hinterachsen, Stand 2004

Differenzierter stellt sich die Technologielandkarte bei den aktuell verbauten Hinterachskonzepten dar. Während in den kostengünstigen Modellen halbstarre Verbundlenkerachsen und in geringem Umfang noch Längslenkerachsen zum Einsatz kommen, ist bei den schweren bzw. teureren Fahrzeugklassen eine breite Fächerung abzusehen.
Starrachsen kommen nur noch bei SUV, Geländewagen und Vans zum Einsatz, wohingegen in der Ober- und Mittelklasse aufwändige Doppelquerlenker- oder Mehrlenkeraufhängungen eingesetzt werden, um trotz des höheren Fahrzeuggewichts die klassenspezifisch hohen Anforderungen an Fahrkomfort und Fahrdynamik erfüllen zu können (**Tabelle 8-2**).
Generell zeigt sich eine Abnahme von Schräg- und Längslenkerhinterachsen sowie von nicht angetriebenen Doppelquerlenker- und Federbeinaufhängungen. An Bedeutung werden dagegen die Mehrlenker-Hinterachsen gewinnen. Die Zunahme von Verbundlenkerachsen ist durch den steigenden Marktanteil von kleineren Fahrzeugen bedingt. Der Einzug von elektronischen Regelsystemen wird ebenfalls zu einer Erhöhung des Mehrlenkeraufhängungsanteils führen [1].

8.1.3 Fahrwerkbestandteile der Zukunft

Dis für das Fahrwerk der Zukunft bestimmenden Komponenten werden in den folgenden Abschnitten kurz beschrieben.

8.1.3.1 Achsantrieb der Zukunft

Bei den Volumenmodellen werden Frontantriebe und an das Getriebe angeflanschte Seitenwellen als Standard gelten. Bei den Premium-Fahrzeugen werden Frontmotor mit Getriebe, Kardanwelle, Hinterachsantrieb und Seitenwellen die Zukunft beherrschen. Die Integration der Achsgetriebe und Achsträger ist realisierbar. Die SUVs werden Allradantriebe mit der Möglichkeit des Torque Vectoring haben. Die eigentliche Umstellung wird jedoch mit der Einführung von Hybrid- bzw. Elektroantrieben erfolgen, die dann den ganzen Antriebsstrang revolutionieren wird.

Tabelle 8-1: Marktübersicht:Vorderachsen im Jahr 2004

	Klein-wagen	Kom-pakt	Mittel-klasse	obere Mittelkl.	Ober-klasse	Sport-wagen	Vans	Gelände-wagen
Starrachsen	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	20%
Halbstarrachsen	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
Längslenker	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
Schräglenker	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
Doppelquerlenk.	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	37,5%	67%	0,0%	60%
McPherson	100%	100%	78%	50%	12,5%	33%	100%	20%
Mehrlenker	0,0%	0,0%	22%	50%	50%	0,0%	0,0%	0,0%

Tabelle 8-2: Marktübersicht:Hinterachsen im Jahr 2004

	Klein-wagen	Kom-pakt	Mittel-klasse	obere Mittelkl.	Ober-klasse	Sport-wagen	Vans	Gelände-wagen
Starrachsen	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	40%
Halbstarrachsen	75,0%	37,5%	22%	16,7%	0,0%	0,0%	25,0%	0,0%
Längslenker	12,5%	25,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	12,5%	0,0%
Schräglenker	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	50,0%	0,0%
Doppelquerlenk.	0,0%	0,0%	0,0%	16,7%	12,5%	55,6%	0,0%	20%
McPherson	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
Mehrlenker	12,5%	37,5%	78%	66,6%	87,5%	44,4%	12,5%	40%

8.1.3.2 Bremse der Zukunft

Die Bremse der Zukunft wird eine elektrische Bremse sein und als Brake-by-wire funktionieren. Die Bremse wird weiterhin für viele fahrdynamische Systeme als Aktuator dienen, die dann im Verbund mit anderen Fahrwerksystemen für die Längs- und Querstabilisierung die Hauptrolle spielen wird.

8.1.3.3 Lenkung der Zukunft

Auch die Lenkung der Zukunft wird rein elektrisch sein und als Steer-by-wire funktionieren. Viele Fahrerassistenzsysteme werden mit Hilfe der Elektrolenkung realisiert. Die Integration der Lenkung in den Achsträger ist durchfürbar. Zusätzlich zur Vorderachslenkung, wird bei Premiumfahrzeugen auch die Hinterachslenkung kommen. Als Vision gilt dagegen die Allradlenkung (*All Wheel Steering*).

8.1.3.4 Federung der Zukunft

Luftfederung oder Aktivfederung werden wegen der hohen Mehrkosten auf Premiumfahrzeuge beschränkt bleiben. Die Volumenautos werden weiterhin mit den Stahlschraubenfedern ausgestattet. Für die Leichtbaufahrzeuge sind die Composit-Blattfedern interessant.

8.1.3.5 Dämpfung der Zukunft

Die hydraulischen Dämpfer werden wegen der günstigen Herstellungskosten und Nutzung als Radführung bestehen bleiben. Neben den linearen Dämpfern werden auch Rotationsdämpfer wieder interessant, jedoch nur bei Fahrzeugen die an der Hinterachse Packageprobleme haben (z.B. Kombifahrzeuge). Bei Premiumfahrzeugen können die Luft-Feder-Dämpfer die hydraulischen Dämpfer mit Stahlschraubenfeder ersetzen und besseren Komfort bieten.

8.1.3.6 Radführung der Zukunft

Die Radführungen der Zukunft werden durch die Herstellkosten bestimmt. McPherson, Verbundlenker und Mehrlenkeraufhängungen werden alle anderen Arten verdrängen. Wenn die Compositwerkstoffe kostengünstig herstellbar sind, ist es denkbar, völlig neue Aufhängungsarten zu realisieren, die Anzahl der Lenker zu reduzieren und die Aufgaben der Federung (vielleicht auch Dämpfung) mit zu übernehmen. Wenn die Elektroantriebe unmittelbar am Rad positioniert werden, benötigen diese eine neue Art der Radführung (s. Abschnitt 4.8.3).

8.1.3.7 Radlager der Zukunft

Die Radlagerung wird als Wälzlager bestehen bleiben, mit Verbesserungen an den Wälzkörpern und Werkstoffen. Die Sensorik und die Radnabe werden voll integriert sein und auch bei Volumenmodellen zusammen mit dem Radträger als Radmodul zum Einsatz kommen.

8.1.3.8 Reifen und Räder der Zukunft

Die Reifen der Zukunft werden durch einen niedrigeren Rollwiderstand Energie sparen helfen (z.B. Gummi mit Silan-Additiven), auch bei Luftverlust weiter benutzbar (Notlaufreifen z.B. *Run Flat*) und für Allwetter tauglich sein. In die Reifen wird mehr Intelligenz in Form von Identifikationschips und Sensoren eingebaut werden. Die Flüsterreifen der Zukunft werden die Rollgeräusche deutlich senken.

8.2 Elektronische Fahrwerksysteme

8.2.1 Elektronische Hilfssysteme und Vernetzung

Im Bereich der Ausrüstung mit Fahrwerksregelsystemen sind zwei Schwerpunkte festzustellen. Zum einen sind fast 100% der untersuchten Fahrzeuge aus allen Klassen mit ABS ausgestattet. In der Regel gehört das ABS bereits zur serienmäßigen Ausstattung, was nur im Niedrigpreissegment nicht zutrifft. Elektronische Bremskraftverteilung und Bremsassistenzfunktionen zeigen ebenfalls einen sehr hohen Ausrüstungsgrad. Den zweiten Schwerpunkt bilden elektronische Stabilitätsprogramme, die sich ausgehend von der Oberklasse und oberen Mittelklasse zunehmend in die niedrigeren Klassen ausbreiten. Deren Funktionsumfang beschränkt sich jedoch nicht ausschließlich auf die Fahrstabilitätsregelung, vielmehr umfasst ein modernes ESP-System auch eine ganze Reihe weiterer Funktionen. Zu nennen sind hier vor allem die Traktionsregelung durch EDS und ASR, die elektronische Bremskraftverteilung EBV und Cornering Brake Control (CBC) zur Erhöhung der Fahrzeugstabilität bei Kurvenfahrt. Durch diese Funktionen kann das Potential, das Bremseingriffe und die Schnittstelle zum Antriebsstrangmanagement bieten, vollständig ausgeschöpft werden. Der volle Funktionsumfang, insbesondere bei der Traktionsregelung, wird jedoch nur in höheren Klassen, bzw. bei Fahrzeugen mit höheren Motorleistungen genutzt.

Erst der Einbau weiterer aktiver Fahrwerkelemente schafft dann Spielraum für zusätzliche Funktionen.

Grundsätzlich gilt, dass Zusatzaktorik und damit auch neue Funktionalitäten zunächst bei Fahrzeugen des oberen Preissegments bzw. bei Fahrzeugen mit besonders sportlichem Charakter eingeführt werden.

Was die weitere Entwicklung kundenrelevanter Funktionen anbelangt, lässt sich feststellen, dass die Stabili-

tätsregelung an den fahrdynamischen Grenzen bereits einen sehr hohen Reifegrad erreicht hat. Weitere Funktionen sind dort kaum zu erwarten, lediglich der Zeitpunkt von unkomfortablen Bremseingriffen kann durch zusätzliche Aktorik weiter hinausgezögert werden.
Gleiches gilt für den Komfortbereich. Systeme zur Beeinflussung der Aufbaubewegung, allen voran semi-aktive Dämpfer oder Active Body Control (ABC), sind bereits fest etabliert und sowohl was die Hardware also auch die Regelung anbelangt bereits weit entwickelt.
Etwas anders sieht dies im Bereich Agilität aus. Zwar wurde bisher versucht, durch eine entsprechende Ansteuerung von aktiven Lenksystemen, Dämpfern und Stabilisatoren das Fahrzeugansprechverhalten zu verbessern und das Fahrverhalten meist in Richtung Sportlichkeit zu verändern. Mit der Einführung von aktiven Allradsystemen wird hier allerdings noch ein deutlicher Fortschritt zu beobachten sein, von dem vor allen Dingen der besonders sportliche Fahrer profitieren wird.
Alle geregelten Systeme benötigen Informationen über den Ist-Zustand des Fahrzeugs. Diese werden durch einzelne Sensoren aufgenommen und dem System bereitgestellt. Jedes System hat eine eigene Sensorik. Künftig werden Sensorcluster, unabhängig von Einzelsystemen, eigenständig die den Ist-Zustand beschreibenden physikalischen Größen aufnehmen und allen Systemen zur Verfügung stellen. Dadurch werden nicht nur die Kosten gesenkt, sondern es werden auch widersprüchliche Informationen verschiedener Sensoren vermieden.

8.2.2 Vernetzung von Fahrwerksregelungssystemen

Im Bereich der Fahrwerksentwicklung wird eine weitere deutliche Funktionssteigerung durch die Einführung von Fahrwerkregelsystemen erwartet. Die zunehmende Zahl an fahrdynamischen Regelsystemen (**Bild 8-3**) macht es erforderlich, das Zusammenspiel so zu gestalten, dass funktionale Synergien genutzt werden können. Möglich wird dies erst durch einen intensiven Informationsaustausch zwischen den einzelnen Systemen. Die Kommunikation zwischen Regelsystemen ist bisher allerdings nur für einige Kombinationen, beispielsweise für die kombinierte Ansteuerung von Lenkung und Bremse im ESP2 etabliert.
Mit der steigenden Anzahl von aktiven Fahrwerkelementen, insbesondere im höheren Preissegment, wächst auch die Notwendigkeit, Regelsystemarchitekturen einzuführen, die den Umgang mit der resultierenden umfangreichen Variantenvielfalt erleichtern und gleichzeitig die gezielte Nutzung von Synergieeffekten erlauben.
Unter diesen und einigen weiteren Gesichtspunkten sollen die Systemarchitekturen der „friedlichen Koexistenz", der „vernetzten Regelung" und der „integrierten Regelung" genauer betrachtet werden.

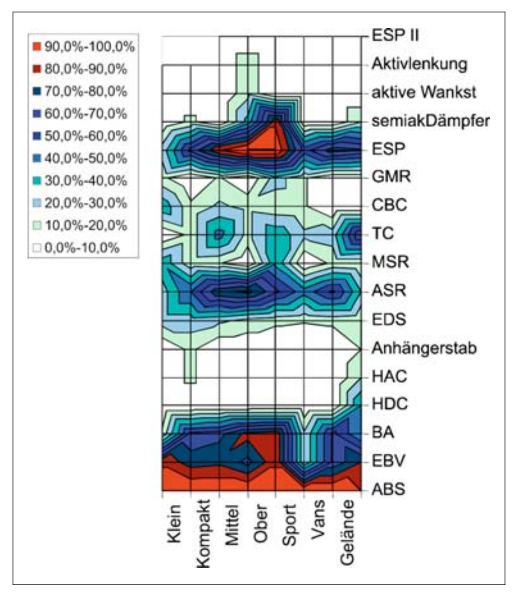


Bild 8-3: Marktübersicht über die elektronischen Hilfssysteme (2004)

8.2.2.1 Friedliche Koexistenz

Im Allgemeinen ist im Bereich der Fahrwerkregelungen die Systemarchitektur der „friedlichen Koexistenz" anzutreffen. Diese zeichnet sich dadurch aus, dass voneinander unabhängige autarke Regelsysteme existieren, deren Regelungsziele sich teilweise überlappen (**Bild 8-4**).

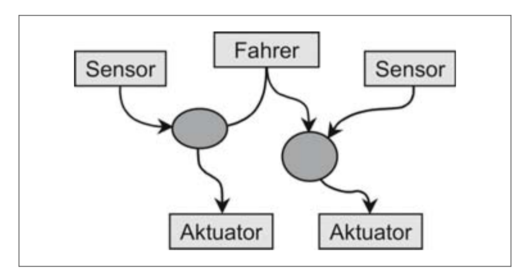


Bild 8-4: Friedliche Koexistenz der Systeme

Die Regelung der Gierrate kann beispielsweise sowohl über radindividuelle Bremseingriffe als auch über Zusatzlenkwinkel an den Fahrzeugachsen vorgenommen werden. Im Fall der „friedlichen Koexistenz" wird zwischen den Reglern aber keine Information ausgetauscht.
Dies kann zu verschiedenen Problemen führen. Da die Systeme die Fahrervorgaben unabhängig vonein-

ander interpretieren, kann durchaus der Fall eintreten, dass die aktuelle Fahrsituation unterschiedlich ausgelegt wird. Während beispielsweise ein System feststellt, dass der Fahrzeugzustand stabil ist und eine Funktion zur Erhöhung der Agilität, also in Richtung Destabilisierung des Fahrzeugzustandes, aktiv wird, sind für ein zweites System die Grenzen der Fahrphysik bereits erreicht. Es versucht das Fahrzeug zu stabilisieren, was im Extremfall zu gleichzeitigen einander entgegenwirkenden Eingriffen führt.
Falls zusätzlich die Zeitkonstanten der Einzelregler ähnlich groß sind, können sogar dynamische Effekte wie Grenzzyklen bis hin zum gegenseitigen Aufschwingen der interagierenden Regler auftreten.
Abhilfe bietet hier nur eine entsprechende Neuparametrierung der Regler. Dass dann das Systempotenzial oft nicht vollständig ausgeschöpft werden kann, wird zu Gunsten des problemlosen Betriebs im Reglerverbund in Kauf genommen.

8.2.2.2 Integrale Regelung

Die Probleme der Architektur der friedlichen Koexistenz lassen sich auf zwei Sachverhalte zurückführen. Zum einen wird, wie bereits geschildert, der Fahrerwunsch systemindividuell ermittelt. Zum anderen wird beim anschließenden Reglerentwurf die Tatsache, dass es sich bei einem Fahrzeug um ein Mehrgrößensystem mit verkoppelten Zuständen handelt, nicht berücksichtigt.
Beiden Punkten kann dadurch Rechnung getragen werden, dass zur Regelung der Fahrdynamik ein zentraler Mehrgrößenregler, gekoppelt an eine globale Bestimmung des Fahrerwunsches, eingesetzt wird (**Bild 8-5**). Der Funktionsumfang der Subsysteme wird dabei auf die Ebene von intelligenten Aktoren reduziert, die überlagerten Regelschleifen vom Zentralregler übernommen.

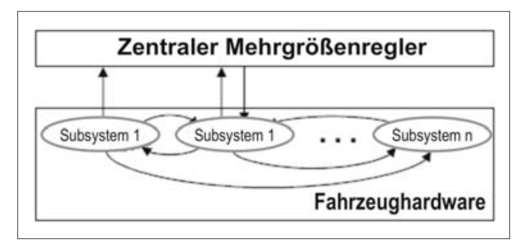


Bild 8-5: Integraler Regler [2]

Fahrdynamische Wechselwirkungen zwischen den unterschiedlichen Subsystemen können so bereits während der Reglerentwicklung entsprechend berücksichtigt und Synergieeffekte einfacher genutzt werden. Dies führt zusammen mit der zentralen Verwaltung aller Reglerparameter zu einer Verringerung des Applikationsaufwandes.

8.2.2.3 Vernetzte Regelung

Einen notwendigen Zwischenschritt von der friedlichen Koexistenz hin zur integralen Regelung stellt die vernetzte Regelung dar (**Bild 8-6**). Wie bei der friedlichen Koexistenz verfügt jedes Subsystem über einen eigenen Regler, der weiterhin auch alle übergeordneten Regelschleifen bis hin zu fahrdynamischen Funktionen enthält. Über zusätzliche Schnittstellen, um die die bestehende Reglersoftware ergänzt wird, kann eine zentrale Überwachung und Koordination der Einzelregler vorgenommen werden.

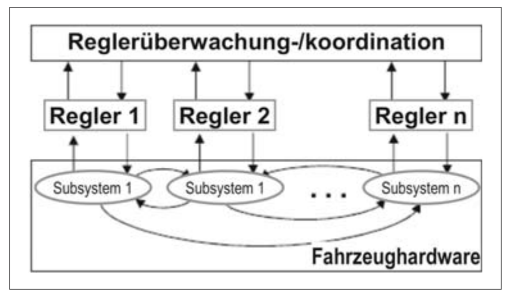


Bild 8-6: Vernetzte Regelung [2]

Durch diese Architektur soll die Endapplikation im Fahrzeug, also das Abstimmen der Systeme auf einander, vereinfacht werden. Die verschiedenen Systeme werden nach wie vor getrennt voneinander entwickelt und appliziert. Sollten bei der Zusammenführung im Fahrzeug, die bei der friedlichen Koexistenz angesprochenen Probleme auftreten, werden für die Reglerkoordination entsprechende Algorithmen entwickelt, die situationsabhängig die Aktivität der Einzelregler beschränken oder teilweise sogar völlig unterbinden. Eine gezielte und gegenüber der friedlichen Koexistenz verbesserte Nutzung von Synergieeffekten lässt sich jedoch nur schwer erreichen.
Nachdem einige Vor- und Nachteile der verschiedenen Architekturen bereits erwähnt worden sind, sollen nun einige weitere Kriterien, die zum Teil auch über die reine Funktionalität hinausgehen, beleuchtet werden.

8.2.2.4 Leistungsfähigkeit

Wie bereits angesprochen lassen sich durch eine integrierte Regelung Synergieeffekte deutlich effizienter nutzen als bei friedlicher Koexistenz. Um darzustellen, in welchen Bereichen Verbesserungen erzielt werden könnten, wurde von Tanaka [3] ein „G-G“-Diagramm der Fahrzeugaufbaubeschleunigungen vorgeschlagen (**Bild 8-7**). Aufgetragen wurde dort die Fahrleistung mit und ohne Schlupf- und Lenkregelsystemen. Durch die reine Kombination, also bei friedlicher Koexistenz, sind besonders im längsdynamischen Bereich deutliche Verbesserungen zu

verzeichnen, während bei großer Querbeschleunigung beide Systeme passiv bleiben. Erst bei einer integrierten Regelung von Lenkwinkel und Längsschlupf wird dort eine signifikante Verbesserung prognostiziert. Die Einführung einer vernetzten Regelung wird zwar Zugewinne auch im querdynamischen Bereich erlauben, jedoch die Messlatte der integrierten Regelung ohne erheblichen Aufwand nicht erreichen.

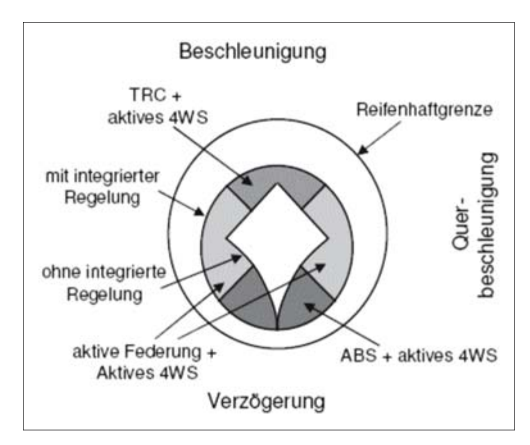


Bild 8-7: Verbesserungspotenzial durch integrierte Regelung [3]

8.2.2.5 Systemsicherheit

Die Architektur der friedlichen Koexistenz ist aus Sicht der Systemsicherheit auf Grund der großen Redundanz an Sensorik und Software als sehr vorteilhaft einzustufen. Die Fehlfunktion eines Systems kann durch die entsprechende Fehlererkennung schnell festgestellt und das System abgeschaltet werden. Die während der Fehlerlatenzzeit, also des Zeitintervalls zwischen Auftreten des Fehlers und Abschaltung des Systems, eintretenden Fehleingriffe können durch die übrigen Systeme aufgefangen werden.

Um die Betriebssicherheit zu gewährleisten, sind bei einer integralen Regelung deutlich erhöhte Anforderungen an die Fehlererkennung und sichere Systemabschaltung zu stellen. Unerkannte Sensorfehler beispielsweise würden zu falschen Stellgrößen für alle Aktoren führen, so dass das Fahrzeug im Gegensatz zur friedlichen Koexistenz unter Umständen nicht mehr beherrschbar wäre.

Die vernetzte Regelung ist im Havariefall mit der friedlichen Koexistenz zu vergleichen, da die Redundanz von Sicherheitsalgorithmen nach wie vor erhalten bleibt. Allerdings muss sichergestellt werden, dass sich bei Ausfall eines Systems der Fehler durch den Austausch von möglicherweise falscher Information mit anderen Reglern nicht im Netzwerk ausbreitet. Die Abschaltung des ausgefallen Reglers muss also sehr schnell erfolgen und durch eine entsprechende Statusmeldung im Netzwerk also auch gegenüber der Reglerüberwachung und -koordination kommuniziert werden.

8.2.2.6 Entwicklungsprozess

Bei friedlicher Koexistenz können die einzelnen Regelsysteme als abgeschlossene Komponenten durch unterschiedliche Zulieferer unabhängig von einander entwickelt und vorappliziert werden. Dies räumt dem OEM nach Erstellung eines Lastenheftes große Freiheit bei Vergabe von Entwicklungsaufträgen ein. Die Vorapplikation ist in der Regel Bestandteil des Auftrags und wird vom Zulieferer für sein stand-alone-System vorgenommen. Erst beim OEM werden erstmals die Systeme in einem Fahrzeug zusammengeführt und in ihrer Kombination getestet. Treten hier funktionelle Konflikte zwischen den Einzelsystemen auf, werden sie zu diesem späten Zeitpunkt im Entwicklungsprozess meist durch eine Reglerumparametrierung und entsprechend erhöhtem Versuchsaufwand abgestellt.

Bei einer integralen Fahrzeugregelung wird der Funktionsumfang der Einzelsysteme zunächst einmal auf die Ebene von *Smart Actuators* reduziert. Die Aufgaben der Systemzulieferer beschränken sich damit auf die Entwicklung der reinen Aktorhardware und hardwarenaher Regelungsfunktionen. Die Entwicklung des zentralen fahrdynamischen Reglers hingegen wird, da es sich hier um die vom Kunden letztendlich wahrnehmbaren Funktionen handelt, vom OEM übernommen. Das bedeutet, dass sich dort im ersten Schritt der Entwicklungsaufwand deutlich vergrößert. Im Gegenzug jedoch wird der Applikationsaufwand deutlich sinken, da zum einen fahrdynamische Wechselwirkungen zwischen den verschiedenen Systemen bereits bei der Reglerentwicklung berücksichtigt werden. Zum anderen kann durch die intime Kenntnis des Reglers die Applikation deutlich effizienter abgewickelt werden.

Die vernetzte Regelung nimmt auch hier eine Zwischenstellung ein. Der Tätigkeitsumfang für den Lieferanten bleibt zunächst einmal unverändert. Er entwickelt nach wie vor ein komplettes Systempaket von Aktorhardware und Reglersoftware. Allerdings muss er die prinzipielle Funktionsweise gegenüber seinem Auftraggeber offen legen, sofern diese nicht im Lastenheft spezifiziert wurde. Dies ermöglicht dem OEM, bei zentraler Koordination der Einzelsystementwicklung, eventuelle Funktionskonflikte noch während relativ früher Phasen der Reglerentwicklung festzustellen. Werden derartige Probleme festgestellt, können diese effizient durch entsprechende Anpassung der Reglersoftware (durch den Zulieferer) beseitigt werden.

8.2.2.7 Anforderungen an die Datenübertragung

Bei der friedlichen Koexistenz sind die Systeme von vorne herein als autarke Einheiten ausgelegt. Falls es die Umweltbedingungen und das Package erlauben, laufen alle Regelfunktionen, angefangen bei der reinen Aktorregelung bis hin zu Fahrdynamikfunktionen, auf einem Anbausteuergerät. Die Verbindung zur ausgelagertern Sensorik wird entweder durch harte Verdrahtung oder aber durch systemeigene Bussysteme hergestellt. Der Fahrzeugbus wird dann nur zum Abgreifen globaler Fahrzeuggrößen bzw. zum Senden von Statusinformationen verwendet. Sensorikdaten und Stellgrößen werden ausschließlich über systeminterne Wege übertragen. Die zusätzliche Belastung des Fahrzeug-CANs ist relativ gering.
Oft ist diese Lösung auf Grund der widrigen Bedingung am Aktoreinbauort nicht möglich. Dann kommt ein Wegbausteuergerät zum Einsatz, das wie auch der Aktor über eine Schnittstelle zum Fahrzeugbus verfügt. Der Datenaustausch zwischen intelligentem Aktor und Steuergerät lässt die Buslauslastung stärker als bei der Lösung mit Anbausteuergerät aber linear zur Anzahl der Einzelsysteme ansteigen. Bei den heute gebräuchlichen ereignisgesteuerten Busarchitekturen kann dies dazu führen, dass die zeitliche Determiniertheit der Kommunikation nicht mehr sichergestellt werden kann.
Bei einer vernetzten Regelung erhöht sich die Buslast, wie im letzten Abschnitt geschildert, zunächst einmal linear mit den verbauten Systemen. Zusätzlich dazu tauschen jedoch auch die Regler untereinander (quadratischer Anstieg mit der Systemanzahl) als auch mit einem übergeordneten Systemkoordinator (linearer Einfluss) Information aus. Die Kapazität des Fahrzeugbusses ist je nach Intensität der Vernetzung deutlich früher erreicht als bei friedlicher Koexistenz.
Die Buslast bei einem integrierten Fahrwerksregler ist aus mehreren Gründen geringer: Bei der Umsetzung eines zentralen Fahrwerksreglers wird, um die Einsparungsmöglichkeiten bei der Hardware optimal nutzen zu können, auch ein zentrales Sensorcluster eingeführt. Das Kommunikationsaufkommen für die Übermittlung von Sensorrohdaten verringert sich. Ebenso entfällt gegenüber der vernetzten Regelung der Informationsaustausch zwischen den Einzelsystemen, deren Intelligenz jetzt zentral zusammengefasst ist. Insgesamt verringert sich die Buslast gegenüber der vernetzten Regelung. Gleichzeitig sind an die Bussysteme jedoch erhöhte Anforderung bezüglich Determiniertheit und Echtzeitfähigkeit zu stellen, die die Einführung von zeitgesteuerten Busarchitekturen, z.B. FlexRay (s. Abschnitt 7.2.6.2) erforderlich machen.

8.2.2.8 Zusammenfassung

Die Systemarchitektur der „friedlichen Koexistenz" verliert mit der zunehmenden Anzahl von Regelfunktionen und aktiven Fahrwerkselementen und den damit auftretenden Problemen zunehmend an Boden und wird auf lange Sicht von einer integrierten Regelung mit hierarchisch organisierten, zentralisierten Reglerstrukturen weichen müssen. Diese wird jedoch neben der Einführung zeitgesteuerter Busarchitekturen, dem erheblichen Aufwand in Bereichen des Reglerentwurfs und der Sicherheitskonzepte auch große Veränderungen in den Entwicklungsprozessen erfordern, so dass sich als mittelfristige Übergangslösung die Vernetzung einzelner auch autark funktionsfähiger Regelsysteme durchsetzen wird.

8.3 X-by-wire-Systeme der Zukunft

Die Vision künftiger Fahrwerkkonzepte könnte wie in **Bild 8-8** dargestellt aussehen: Jedes einzelnen Rad hätte seine individuellen Funktionsmodule, die Längs-, Vertikal- und Querdynamik bestimmen. D.h., jedes Rad besitzt einen eigenen Antrieb, Bremse, Lenkung, Federung, Dämpfung und Führung. Damit hätte man die maximale Flexibilität und die Steuerungsmöglichkeiten jedes Rades erreicht, unabhängig von den anderen Rädern.

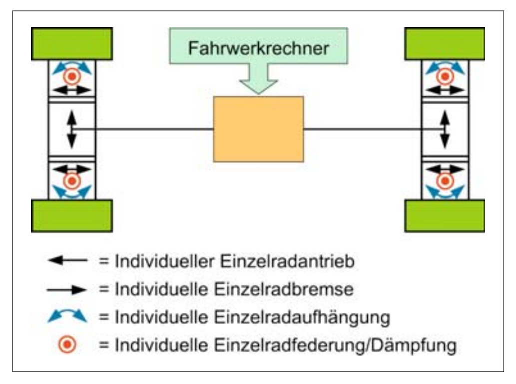


Bild 8-8: Vision vom Fahrwerk der Zukunft mit radindividuellen Systemen [1]

Dies setzt jedoch voraus, dass alle Systeme aktiv funktionieren, miteinander vernetzt sowie ineinander integriert und als X-by-wire steuerbar sind. Das Unterbringen aller Funktionen in einer Einheit erfordert natürlich ein höchstes Maß an Modulintegration, das sich nur durch eine intelligente Mechatronik realisieren lässt (s. auch Abschnitt 4.8.3).
Einige Teile der Vision sind ja jetzt schon Realität: Allradantrieb, Radbremse, Einzelradaufhängung, aktive Fahrwerksysteme, X-by-wire, Global Chassis System. Dies beweist die Richtigkeit und Machbarkeit der Vision. Mit dem Einsatz von Hybrid-Antrieben wird bereits untersucht, ob nicht jedes Rad einen eigenen

Antrieb als E-Motor hat. Auch die ersten Projekte in dieser Richtung sind bereits bekannt; Radantrieb von Brembo, Michelin (IAA 2003) und Bridgestone (**Bild 4-78**) oder das Mitsubishi Hybridkonzept EZ MIEV mit Radnabenmotoren. Die Integration des E-Motors könnte die Bremsen, zumindest an einer Achse, durch Energierekuperation ersetzen.
Brake-by-wire wird sich sicherlich nach der erfolgreichen Einführung einer elektromotorischen Bremse auf breiter Front durchsetzen. Die Notwendigkeit des Steer-by-wire ist jedoch nach Einführung der aktiven Lenkung in Frage gestellt, weil diese die Vorteile des Steer-by-wire ermöglicht, ohne aufwändige und teure Sicherheitsmaßnahmen. Nur wenn die heutige räumliche Nähe des Fahrers zum Lenkgetriebe aufgegeben oder das Lenkrad durch ein anderes Steuerelement ersetzt wird, wird Steer-by-wire an Bedeutung gewinnen. Gas-by-wire, Clutch-by-wire, Shift-by-wire bilden heute den Stand der Technik und Leveling-by-wire ist relativ einfach realisierbar.

8.4 Vorausschauende und intelligente Fahrwerke der Zukunft

Die Zielsetzung der Aktivitäten hinsichtlich intelligenter und vorausschauender Fahrwerke ist die Optimierung des Kompromisses zwischen Komfort und Fahrsicherheit. Für konventionelle, passive Fahrwerke existiert eine Grenzkurve hinsichtlich möglicher Kombinationen aus Sicherheit und Komfort (**Bild 8-9**). Diese Kurve zu überschreiten ist nur möglich, indem Fahrwerke aktiv reagieren oder – noch besser – agieren können. Dies kann einerseits durch verbesserte Sensorik und Aktuatorik im Fahrzeug und andererseits durch die Verwendung von Informationen von außerhalb des Fahrzeug-Sensierungsbereichs auf der Ebene der Navigation und der Antizipation erreicht werden. Beide Ansätze haben großes Potenzial hinsichtlich den Sicherheits-, Komfort- und Fahrdynamikeigenschaften eines Fahrzeugs, stellen aber unterschiedliche Anforderungen an die Sensorik, Aktuatorik und die Verknüpfung der Informationen. Im Folgenden sind die zu erwartenden Entwicklungen auf diesen Gebieten ausgeführt.

8.4.1 Fahrzeugsensorik

Die Erkennung bzw. Voraussage über die Reibverhältnisse zwischen Reifen und Fahrbahn bietet Potenzial zur Erhöhung der Fahrsicherheit. Bereits in Entwicklung sind berührungslose Straßenzustandssensoren auf der Basis von breitbandigem Infrarotlicht, die über die Analyse des reflektierten Lichts Eis, Schnee und ggf. die Wasserstandshöhe auf der Strasse detektieren können [5]. Ein anderer Ansatz ist die Verwendung von Sensoren zur Erfassung der Griffigkeit im Reifen selbst. Beide Systeme bieten die Möglichkeit, eine Anpassung der Fahrdynamik durch Motor- oder Bremseingriff zu veranlassen.
Großes Potenzial hinsichtlich des Fahrkomforts bieten vorausschauende Fahrwerke, die mittels Sensorik Informationen über Fahrbahnunebenheiten vor dem Fahrzeug für die Voreinstellung von Federn und Dämpfern gewinnen können. Solche Systeme sind bislang nur prototypisch umgesetzt und nur in Zusammenhang mit schneller Aktuatorik in den Fahrzeugen sinnvoll.

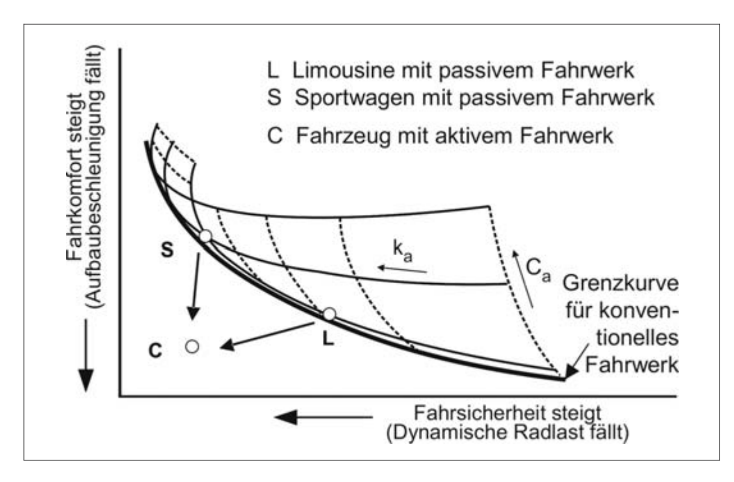


Bild 8-9: Kompromiss zwischen Fahrsicherheit und Komfort

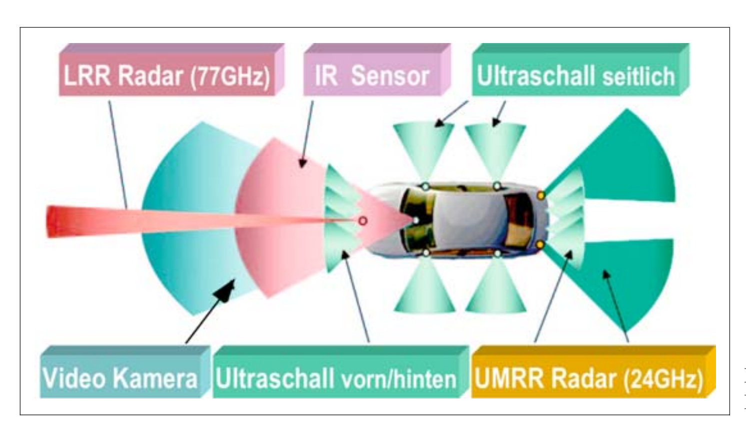


Bild 8-10:
Fahrzeugsensorik [5]

Die für die Erfassung der Verkehrs- und Umfeldsituation relevante Fahrzeugsensorik ist technisch realisiert und grundsätzlich verfügbar (**Bild 8-10**). Eine Klasse bilden Nah- und Fernbereichsradaren, die umgebende Fahrzeuge detektieren können und vor allem für ACC-Funktionalitäten (Active Cruise Control) genutzt werden [7].

Eine vergleichbare Funktionalität bei stark erhöhten Sensorfähigkeiten hinsichtlich Reichweite, Öffnungswinkel und der Erkennung von stehenden Gegenständen haben die so genanten Laserscanner, deren Serieneinsatz aber auf Grund der hohen Kosten noch nicht realisiert ist.

Ein Technologiesprung hinsichtlich der Qualität von Sensorinformationen für die Fahrdynamikregelung ist die Verwendung von Videobildern. Voraussetzung dafür ist die Zuverlässigkeit der Bilderkennung unter allen Umweltbedingungen. Neben der Erkennung anderer sich bewegender und stehender Fahrzeuge kann auch die Erkennung von Verkehrsschildern und auch nicht metallischen Objekten (z.B. Fußgänger) realisiert werden.

Sensorik außerhalb des Fahrzeugs

Informationen über Kurvenradien und Streckenverlauf aus GPS-Daten können zur Anpassung der Getriebe-Gangstufen und Fahrgeschwindigkeit herangezogen werden. Es ist vorstellbar, dass diese Daten auch Informationen über den Straßenzustand in Form spektraler Unebenheitsdichten enthalten und somit zur Anpassung des Fahrwerks an die Strecke benutzt werden können. Die Daten liegen aber derzeit noch nicht in einem zuverlässigen und für die Fahrdynamikregelung ausreichenden Detaillierungsgrad vor.

Telematikinformationen über Verkehrssituation und Straßenzustand können dem Fahrer bereits heute zur Information zugänglich gemacht werden, sind aber hinsichtlich Detaillierungsgrad und Aktualität für die Fahrdynamikregelung noch nicht ausreichend.

Die dauernde Positionsbestimmung über GPS und Weitergabe von relevanten Informationen über Fahrbahnzustand und Verkehrssituation (Verschmutzung, Nebel, etc.) an in der Nähe befindlichen Fahrzeuge (Car-to-car-Kommunikation) wird derzeit noch nicht praktiziert, bietet aber ein großes Potenzial. Neben der Weitergabe von Informationen für die Fahrwerksregelung ist auch die Verwendung der Positions- und Bewegungsinformationen zur Vermeidung von Kollisionen oder dem Abkommen von der Fahrbahn über den Eingriff in die Fahrzeuglängsregelung angedacht.

8.4.2 Aktuatorik

Im Bereich der nicht passiven Fahrwerke können drei Varianten unterschieden werden. Diese sind zum einen adaptive Fahrwerke, die eine stufenweise Einstellung der Dämpferkennlinie durch den Fahrer ermöglichen. Semi-aktive Systeme passen die Dämpferkennlinien in Stufen oder stufenlos selbstständig und ohne Fahrereingriff an die Erfordernisse der Fahrbahn an. Beide Systeme sind in verschiedenen Ausführungen und Fahrzeugklassen bereits im Markt erhältlich.

Eine eigene Klasse bilden die aktiven Fahrwerke, wobei hier zwischen langsamen (Stellfrequenz < 3 Hz) und schnellen Systemen unterschieden wird. Bei diesen Fahrwerken sind Feder- und Dämpferkennlinien stufenlos verstellbar. Insbesondere mit schnell regelnden aktiven Fahrwerken sind große Verbesserungen hinsichtlich Fahrsicherheit bei gleichzeitigem Komfortgewinn möglich. Der Ansatz der aktiven Fahrwerke bedeutet letztendlich, die Normalkräfte in der Reifenaufstandsfläche aktiv einstellen zu können.

Als Prototyp realisiert ist bereits die Vertikalführung der Räder über einen linearen Elektromotor (**Bild 7-68**) von Bose [8]. Der Motor beeinflusst mittels Leistungsverstärker und einer intelligenten Regelung die Normalkräfte im Reifenaufstandspunkt. Durch ein solches aktives System kann die Leistungsgrenze passiver Fahrwerke hinsichtlich Komfort und Sicherheit deutlich nach oben verschoben werden. Es lassen sich nicht nur Fahrbahnunebenheiten durch die

schnelle Aktuatorik fast vollständig kompensieren, sondern auch die Nick- und Wankbewegungen des Fahrzeugs frei einstellen. Voraussetzung dafür sind eine schnelle Signalverarbeitung, Leistungselektronik und die hinterlegten Rechenmodelle.
Problematisch ist bei den hohen Stellgeschwindigkeiten und -kräften der Leistungsverbrauch. Im Fall der Linearmotoren kann eine Rekuperation durch die als Generator betriebenen Elektromotoren stattfinden, was den Energiebedarf senkt. Ist dies nicht möglich, können aktive Fahrwerkselemente zu einem deutlich erhöhten Kraftstoffverbrauch führen.
Die funktionalen Möglichkeiten aktiver Fahrwerke werden erweitert durch die Verknüpfung mit vorausschauender Sensorik. Das Fahrwerk kann sich auf die bevorstehende Fahrbahnrauhigkeit oder auch auf erkannte Einzelhindernisse einstellen und somit zeitlich begrenzt den Komfort für die Insassen erhöhen, ohne generell Einbußen hinsichtlich der Fahrsicherheit in Kauf nehmen zu müssen.
Ein zweiter Weg, Informationen aus verbesserter Sensorik in- oder außerhalb des Fahrzeugs für die Erhöhung der Fahrsicherheit zu nutzen, sind auf Telematikdaten basierende Eingriffe in das Motormanagement. Durch eine Reduzierung des Antriebsmoments kann die Fahrgeschwindigkeit an den zu erwartenden Fahrbahnverlauf oder die Fahrbahnbeschaffenheit angepasst werden. Die gleiche Funktionalität ist auch über einen Bremseneingriff möglich. Bei beiden Systemen ist die Aktuatorik in den Fahrzeugen durch E-Gas und ESP schon vorhanden.
Zusätzliche Möglichkeiten, Kollisionen zu verhindern bzw. den Ausweichvorgang sicher zu gestalten, sind aktive Lenkeingriffe bzw. eine variable Verteilung von Antriebsmomenten zwischen einzelnen Rädern. Während die Stabilisierung eines fahrerinitiierten Ausweichvorgangs eine evolutionäre Verbesserung der bekannten Stabilisierungsfunktion bedeutet und an sich keiner zusätzlichen Sensorik bedarf, ist die aktive Einleitung oder Unterstützung des Fahrers bei einem Ausweichvorgang von intelligenter Sensorik abhängig.

8.4.3 Vorausschauendes Fahren

Unter „vorausschauendem Fahren" versteht man, dass die Fahrbahn, Vorausverkehr, Umweltbedingungen, Verkehrseinschränkungen im voraus bekannt sind, damit der Fahrer und das Fahrzeug rechtzeitig für diese Situation optimal vorbereitet und angepasst werden können (**Bild 8-11**).
Beim vorausschauenden Fahrwerk wird der übergeordnete Fahrdynamikregler mit den Systemen für passive Sicherheit bzw. für intelligente Umwelterfassung vernetzt. Hier geht es vor allem um das Erfassen von Fahrbahnverlauf, -steigung, -beschaffenheit aber auch um frühzeitiges Erkennen der Verkehrssituation. Sind diese Daten bekannt, kann die Elektronik die Fahrwerkeinstellungen bereits im voraus anpassen sowie Motordrehzahl, Getriebegangstufe, Fahrzeuggeschwindigkeit rechtzeitig beeinflussen. Dann kann, z.B. kurz vor einer Kurve, die Federung und Dämpfung straffer eingestellt, der Sturzwinkel der Räder auf Minus gestellt und, wenn nötig, die Geschwindigkeit reduziert und der Getriebegang heruntergeschaltet werden [9].

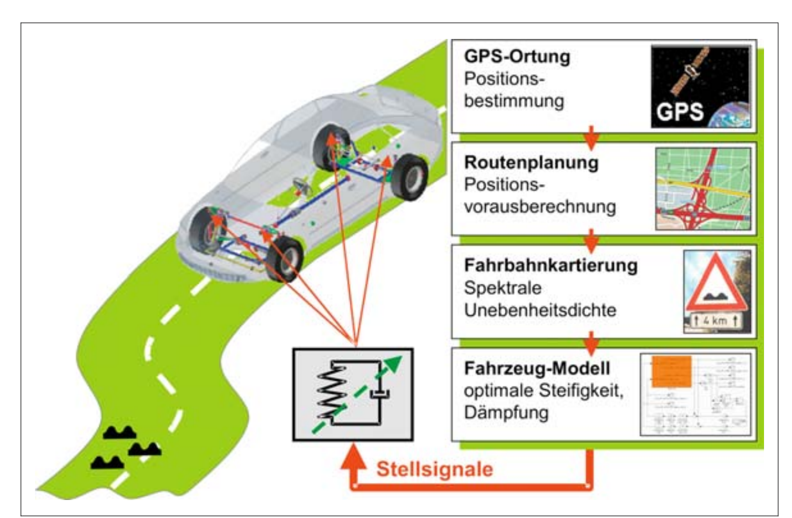


Bild 8-11:
Vorausschauendes Fahrwerk

Damit hätten alle aktiven Fahrwerksysteme ausreichend Zeit, ohne großen Leistungsbedarf die notwendige Voreinstellungen vorzunehmen. Dieses Konzept ist bereits als *Crash Prediction* (Pre-safe) in Verbindung mit einem *Active Safety System* im Serieneinsatz.

Die für das vorausschauende Fahrwerk notwendigen Informationen können gewonnen werden:

- aus dem Fahrzeugzustandsdaten (z.B. Geschwindigkeit, Beschleunigung, Gangzahl, Lenkwinkel, Bremsdruck, Radschwingungen, Licht an/aus, Wischer an/aus, Blinker an/aus, Außentemperatur usw.),
- durch Umfeldsensorik am Fahrzeug,
- aus den Navigationssystemen,
- aus externen Systemen per Funk (Baken),
- aus den vorausfahrenden Fahrzeugen,
- über einen Zentralrechner und Mobilfunk,
- durch genaue GPS-Ortung des Fahrzeugs.

Die Fahrzeugzustandsdaten stehen bei allen neuen Automodellen zur Verfügung. Die Navigationssysteme bieten Daten über den Fahrbahnverlauf, jedoch nicht über die Fahrbahnbeschaffenheit und über Steigungen.

Ein integriertes Telematiksystem der Zukunft könnte wie folgt aussehen: In jedem Auto sind alle zum Fahren dieses Autos notwendigen Informationen, Einstellungen und Sensordaten verfügbar. Die eigenen Daten können zwar für dieses Fahrzeug nicht vorausschauend benutzt werden, jedoch für die nachfahrenden Fahrzeuge übermittelt werden, damit sie vorausschauend reagieren. In allen Pkws werden diese Daten in einem Multifunktionsgerät gesammelt und mit kurzen regelmäßigen Abständen zusammen mit Uhrzeit, Fahrzeugposition und Fahrzeugdaten (**Tabelle 8-3**) über Mobilfunk (UMTS) oder Satellit zu einem Zentralrechner übermittelt (**Bild 8-12**).

Der Zentralrechner bearbeitet aus diesen Daten alle für die nachfahrenden Pkws wichtigen Informationen. Damit sind nicht nur die statischen Navigationsdaten, sondern auch alle andere dynamischen Daten (Verkehrsdichte, Unfall, Fahrbahnsperre, Fahrbahnbeschaffenheit, Fahrbahnoberfläche (Wasser, Eis), Außentemperatur, Lichtverhältnisse, Nebel, Schnee usw.) online verfügbar. Diese aktuellen Daten über die Strecke vor dem Fahrzeug werden dann einerseits für die Navigation und Stauumgehung aber auch als vorausschauende Informationen, die die Fahrwerkeinstellungen vornehmen und dem Fahrer assistieren oder warnen, benutzt (**Bild 8-13**).

Tabelle 8-3: Daten und Nutzen eines Telematiksystems zum vorausschauenden Fahren

Fahrzeugdaten	Identifikation, Standort, Uhrzeit, Geschwindigkeit, Drehzahl, Richtung, Drehmoment, Gang, Neigung, Lenkwinkel, Gierratensensor, ABS/ESP-Eingriffe, Fern-Nebellichter, Blinker, Bremse, Außentemperatur, Scheibenwischer, Lenkerbeschleunigung, Crashsensoren
Verkehrsdaten	Verkehrsdichtenermittlung nach Pkw-Anzahl und Geschwindigkeit, Wetter- und Staumeldung und Umleitungsvorschläge, Unfallwarnung, Straßensperren, Umleitungen, Statistiken
Navigationsdaten	Hinzufügung der Städte- und Straßennamen in die System-Software zur Ermittlung der Routen nach Zeit oder Verbrauch
Fahrassistenz	Warnung vor Fahrbahnschäden, Verkehrseinschränkungen
Vorausschauendes Fahren	Aus eingehenden Daten rechtzeitig und situationsgerecht die notwendige Voreinstellungen vornehmen
Ferndiagnose	Diagnose, Service, Wartung, präventive Schadenserkennung
Sonstiges	Fahrzeugortung, Notsignal, Fahrtenbuch, Flottenmanagement, Mautgebührerhebung, Unfallnachforschung, Auto-Bankkonto

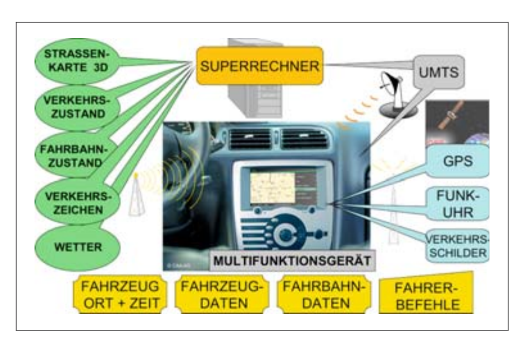


Bild 8-12: Datensammlung und -übertragung aus vorausfahrenden Pkws zum Zentralrechner

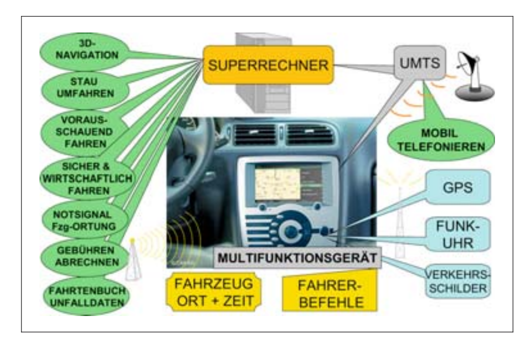


Bild 8-13: Bearbeitete Daten aus dem Zentralrechner zum aktuellen Pkw und deren Weiternutzung

Die notwendigen Geräte dafür sind heute schon bei jedem Auto mit einem Navigationsgerät und Mobilfunkanschluss vorhanden. Die müssten nur noch entsprechend aufgerüstet werden.

Da die Infrastruktur für Mobilfunk weitgehend überall verfügbar ist, sind dafür keine neuen Investitionen notwendig. Es wird durch das Telematiksystem besser ausgelastet und ggf. nur erweitert. Außerdem würde der Mobilfunkprovider weiterhin die Gebühren für normale Mobilfunkgespräche in Rechnung stellen und kann durch das System seinen Kundenkreis erweitern. Erforderlich sind die Ausgaben für die Zentralrechner, die die Daten sammeln, bearbeiten und für die nachfahrenden Fahrzeuge zur Verfügung stellen. Ein Merkmal dieses Systems ist die selbstlernende und sich ständig aktualisierende Wirkung ohne menschliche Intervention.

8.5 Hybridfahrzeuge

Haupttreiber für die Entwicklung von Hybridantrieben sind heute die Emissionssenkung, die Verbrauchsminderung und die Verbesserung von Fahrleistungen. Entscheidend für den Markterfolg wird dabei ein gutes Kosten-Nutzen-Verhältnis sein. Da die Realisierung eines rein elektrischen Fahrbetriebs der größte Kostentreiber bei der Entwicklung und Produktion von Hybridfahrzeugen ist, haben unter diesem Gesichtspunkt so genannte „milde" Hybride (Boost- und Stop&Go-Funktionalität) einen Kostenvorteil vor den sehr aufwändigen und damit teuren Voll-Hybriden mit einem rein elektrischem Fahrbetrieb [10, 11]

Der Einsatz von Hybrid-Antriebskonzepten sollte nicht zu einer Verschlechterung der Fahreigenschaften gegenüber dem jetzigen Stand der Technik führen. Es kann daher davon ausgegangen werden, dass Fahrwerke für Hybrid-Fahrzeuge zunächst keine revolutionär neuen Lösungen erfordern, sondern Anpassungen herkömmlicher Fahrwerke sind. Im Markt befindliche Hybride arbeiten daher auch mit in den herkömmlichen Antriebsstrang integrierten Elektromotoren. Die Integration erfolgt über leistungsverzweigte Getriebe (Lexus RX400h, Toyota Prius und Estima, Ford Escape HEV) oder direkt in die nicht vom Verbrennungsmotor angetriebene Achse (Honda Civic IMA / Insight, GM Tahoe / Yukon). Im Funktionsumfang Fahrwerk kann die Nutzung des Elektromotors im Generatorbetrieb (Rekuperation) als „Dauerbremse" die Auslegungsmöglichkeiten der reinen Betriebsbremsen durch ein verändertes Lastkollektiv positiv beeinflussen.

Die Ausrüstung von Fahrzeugen mit einem herkömmlichen Einsatzspektrum mit Radnabenmotoren würde je nach Ausführung zu einer erheblichen Erhöhung der ungefederten Massen und damit zu einer Verschlechterung des Fahrkomforts führen. Dies ist das Haupthindernis für den Einsatz von Radnabenmotoren, die Gewichtsreduzierung demnach auch die größte Herausforderung. Andererseits bieten Radnabenantriebe in Verbindung mit herkömmlichen Antriebssträngen auch einige Vorteile. So ist bei Installation an der vom Verbrennungsmotor nicht angetriebenen Achse eine relativ einfache Realisierung von Allrad-Funktionalitäten möglich, mit den damit verbundenen Vorteilen hinsichtlich Handling und Traktion. Zur Verbesserung der Handlichkeit und der Manövrierbarkeit trägt auch die Möglichkeit bei, die Antriebsmomente frei auf die einzelnen Rädern zu verteilen (Torque Vectoring) und die möglichen Radeinschlagswinkel durch den Wegfall der Antriebswellen zu erweitern, wie es bei der Toyota-Studie Fine-S realisiert ist.

Ein weiteres Argument für den Einsatz von Radnabenantrieben ist der Wegfall von Verteilergetriebe und Antriebswellen. Dies bedeutet in erster Linie einen erheblichen Bauraumvorteil, verbunden mit der Entzerrung und Flexibilisierung des Package, aber auch eine Reduktion der Verlustleistung im Antriebsstrang. Auch die bei Hybrid-Fahrzeugen meist recht aufwändige Leistungsverzweigung kann entfallen. Die genannten Vorteile haben Radnabenantriebe aber nur in Verbindung mit einem reinen Elektroantrieb, da bei zusätzlicher Verwendung eines Verbrennungsmotors der Bauraumaufwand insgesamt steigt und die Einbausituation verschlechtert wird.

Der Einsatz von Radnabenmotoren wäre unter dieser Bedingung also in Fahrzeugen sinnvoll und wahrscheinlich, deren Einsatzspektrum von dem herkömmlicher Fahrzeuge abweicht. Denkbar wären Fahrzeuge, die im Bereich geringer Längs- und Querdynamik eingesetzt werden, was den Nachteil der höheren ungefederten Massen relativiert. Zugleich ist davon auszugehen, dass das Transport- und Innenraumvolumen bei diesen Fahrzeugen eine übergeordnete Rolle spielt, da hier der Radnabenmotor seinen Bauraumvorteil ausspielen kann. Der fahrdynamische Bereich wäre zu Gunsten eines erhöhten Transportvolumens und der Flexibilität im Innenraum einge-

schränkt. Extreme Handlichkeit und Emissionsfreiheit prädestinieren ein solches Fahrzeug für den Einsatz besonders in Ballungsräumen [12]

8.6 Selbstfahrendes Chassis, Rolling/Driving Chassis

Bei den Fahrzeugen mit Leiterrahmen (meist Light Trucks in den USA) ist es üblich, das ganze Fahrwerk inklusive der Kraftstoffanlage und der Kardanwelle vorher zusammenzubauen. Damit hat man ein rollendes Chassis, das von den Systemlieferanten montiert und zum Endmontageband des OEMs gerollt werden kann (**Bild 8-14**).



Bild 8-14: Das „Rolling Chassis“ (Fa. DANA) [13]

Die in Kapitel 4 angesprochene Standardisierung der Fahrwerke bei gleichzeitiger Diversifizierung der Fahrzeugkonzepte wird in der Konsequenz zu weiter verfeinerten Rolling-Chassis-Lösungen führen. Es ist die Zweiteilung des Fahrzeugs:das Chassis, mit allen für das Fahren erforderlichen Komponenten und dem Fahrgastraum mit den Bedienelementen, die sich möglichst unabhängig voneinander entwickeln lassen. Diese Lösung ist die logische Fortsetzung einiger Trends, die heute schon den Aufbau und die Gestaltung der Fahrzeuge bestimmen.

Neben den bekannten Vorteilen der Modularisierung hinsichtlich Entwicklungskosten und -zeiten und den Vorteilen bei Logistik und Montage spiegelt sich im Weiterdenken der Plattformstrategie der Trend zur Vereinheitlichung von Komponenten wieder, die nicht unmittelbar in der Wahrnehmung des Kunden liegen. Dazu gehören auch die mechanischen Komponenten des Fahrwerks, von denen der Kunde nur die resultierenden Fahreigenschaften wahrnimmt. So ist es denkbar, dass für verschiedene Fahrzeugkonzepte ein mechanisch identisches, aber unterschiedlich abgestimmtes Fahrwerk Verwendung findet.

Die Vereinigung von Antrieb und Fahrwerk im Chassis erlaubt einen tiefen Fahrzeugschwerpunkt, eine sehr ebene Bodengruppe und damit verbunden große Gestaltungsfreiheit für den Fahrzeuginnenraum. Die Voraussetzung dafür ist ein besonders dichtes Package in der Bodengruppe und die Entflechtung der komplexen mechanischen Verbindungen zwischen Fahrer, Antrieb und Fahrwerk. Eine Schlüsseltechnologie dafür sind die X-by-wire Funktionalitäten und in letzter Konsequenz ein vollelektrischer Antrieb. Erhöhte Flexibilität im Package und der Wegfall der durch den Verbrennungsmotor bedingten Maßnahmen zur Verbesserung des Komforts, ermöglichen neben der Gewichtsreduzierung auch die erforderlichen Package-, Komfort- und Bauraumvorteile, so dass das erforderliche, gedrängte Package im Chassis möglich wird. Da ja nun dieses Chassis theoretisch auch (ferngesteuert) selbst fahren kann, könnte es *Driving Chassis* genannt werden (**Bild 8-15**).

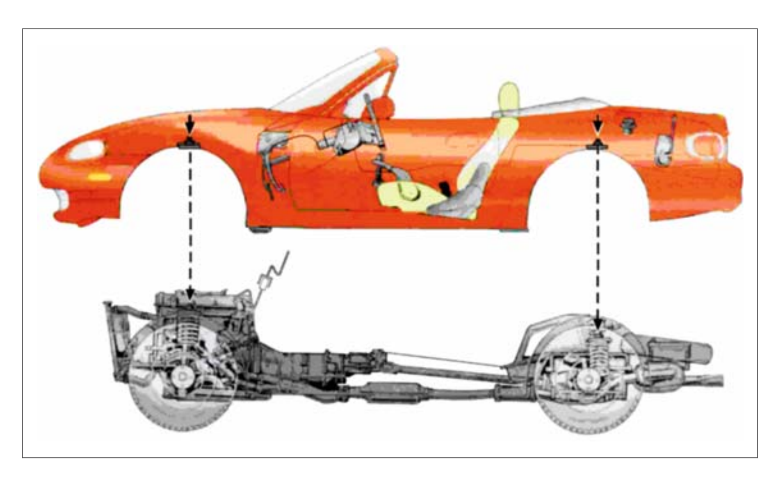


Bild 8-15:
Beispielhafte Darstellung des Driving Chassis, bestehend aus einem kompletten, fahrbaren Fahrwerk und dem dazugehörigen Aufbau;außer den Verbindungsstellen werden keine mechanischen Schnittstellen mehr gebraucht [9]

Charakteristisch für das Fahrwerk werden kurze Überhänge sein, die einen großen, ebenen Innenraum ermöglichen und einen erhöhten Komfort durch geringere Nickbewegungen bedeuten. Um Stauraum bzw. Flexibilität zu optimieren, werden niedrig bauende Hinterachskonstruktionen zum Einsatz kommen. Denkbar für Fahrzeuge ohne verbrennungsmotorischen Antrieb ist der Einsatz von Radnabenmotoren (ungefederte Masse) oder radindividuellen Motoren, die sich in der unmittelbaren Nähe des Rades befinden (gefederte Masse). Durch den Wegfall der Antriebswellen können sehr große Radeinschlagswinkel realisiert werden, die auch bei der Konstruktion der Vorderachse berücksichtigt werden müssen. Der Einsatz von Überlagerungslenkungen ist dabei wahrscheinlich, damit keine zu großen Lenkradwinkel, z.B. beim Parkieren, erforderlich werden. Die aktuellen Konzeptbeispiele dazu sind Toyota Fine-N und Fine-S, GM Hy-Wire und Mitsubishi MIEV.

8.7 Autonomes Fahren in der Zukunft?

Mit den sich ständig erweiternden Fähigkeiten in der Sensorik, Mechatronik, Datenverarbeitung und Kommunikation können dem Fahrer eines Automobils zahlreiche Assistenzfunktionen bereitgestellt werden, die die Fahrt im Straßenverkehr sicherer und komfortabler ablaufen lassen. Die sich abzeichnenden Fortschritte in der Umgebungserfassung und der Situationsinterpretation lassen in der Weiterentwicklung dieser Systeme (Abschnitt 7.8) die Vision einer voll automatischen Fahrt immer greifbarer werden.

Der seit den Anfängen des Automobils bestehende Regelkreis aus dem Fahrer, der die kybernetischen Leistungen zur Fahrzeugführung und zur Bewältigung zahlreicher Nebenaufgaben erbringt, und dem Fahrzeug als Regelstrecke könnte damit durch ein autonomes kognitives System ersetzt werden. Ob, wann und wie der Fahrer die Fahrzeugführung und damit auch die Verantwortung für die Sicherheit der Fahrt vollständig an ein autonomes System wie in **Bild 8-16** abgeben kann, ist Gegenstand zahlreicher Forschungsarbeiten und zentrales Thema vieler Fachkongresse. Hier wird nicht nur von der Entlastung des Fahrers gesprochen, sondern auch von einem bis zu 3-mal höheren Durchsatz von Fahrzeugen auf den Fahrspuren. In allen Abhandlungen wird z.Z. von dramatischen Verbesserungen der Leistungen der für eine automatische Fahrt wichtigen Komponenten berichtet.

Dennoch beschränken sich die bereits eingeführten Assistenzsysteme bisher auf die Ausführung und Unterstützung einer vom Menschen aufgrund seiner Interpretationen der Fahrumgebung vorgegebenen Fahrzeugbewegung. In diesen Systemen sind die auftretenden Regelabweichungen auf der Basis einfach zu erfassender Signale aus dem Fahrzeug sicher zu erkennen und auszuregeln. Diese Regelaktivitäten spielen sich teilweise in einem höheren Frequenzbereich ab, in dem der Fahrer ohnehin nicht handlungsfähig ist (**Bild 8-17**).



Bild 8-16: Vision „Autonomes Fahren"

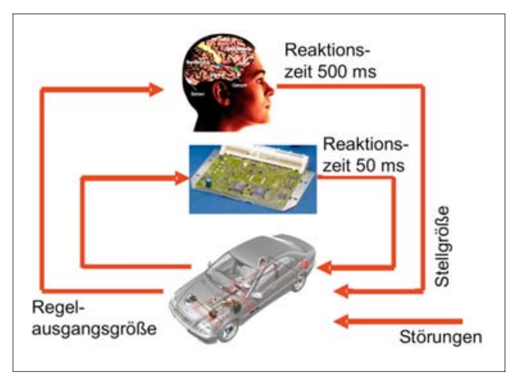


Bild 8-17: Regelkreis Fahrer–Fahrzeug–Umfeld mit Assistenzsystem [14]

Schwieriger zu erfassen und zu interpretieren sind Informationen aus der Fahrumgebung, die die Basis für die zeitliche und räumliche Bestimmung des Fahrtkurses bilden. Hier ist nicht nur ein dynamisches räumliches Geschehen zu interpretieren. Es müssen darüber hinaus Prognosen über die Bewegungen aller Verkehrsteilnehmer auf der Kenntnis derer Eigenschaften und Fähigkeiten in Echtzeit erbracht werden. Soll ein Assistenzsystem in diesem Aspekt die Fahrzeugführung unterstützen, so muss die Umfeldinterpretation mit zumindest gleicher Qualität wie beim menschlichen Fahrer erfolgen. Andernfalls würden Eingriffe in die Fahrzeugführung vom Fahrer nicht akzeptiert oder die automatische Fahrt unter einem erhöhten Unfallrisiko ablaufen.

Gegenwärtig erreicht die automatische Umfelderfassung und -analyse das menschliche Leistungsvermögen bei weitem noch nicht. Würde ein Assistenzsys-

tem bei drohender Unfallgefahr automatisch intervenieren, so übernähme es auch die Verantwortung für die Sicherheit des Fahrvorgangs. Dies ist auf der Basis der gegenwärtigen Unschärfe der Umfeldwahrnehmung und der stark vereinfachten Situationsinterpretation überhaupt nicht möglich. Jedoch können dem Fahrer auf der Basis der sich ständig erweiternden Fähigkeiten der Assistenzsysteme Informationen, Handlungsempfehlungen und „Handreichungen" angeboten werden, die mit großer Zuverlässigkeit generiert den Fahrer bei der Fahrzeugführung unterstützen. Jedoch wird er sie nur dann nutzen, wenn die von Assistenzsystemen angebotenen oder erbrachten Leistungen zuverlässig erbracht werden, für den Fahrer nachvollziehbar sind und zu akzeptablen Mehrkosten verfügbar sind.

Die Assistenzsysteme werden schrittweise Copilot-Funktionen und Aufgaben zum Chassismanagement unter der Verantwortung des Fahrers übernehmen (**Bild 8-18**). Auf abgesperrten Stecken ist eine vollautomatische Längs- und Querführung nach dem aktuellen Stand der Technik darstellbar (**Bild 8-19**). In diesem Fall würde die Verantwortung für die Fahrsicherheit auf den Streckenbetreiber und den Fahrzeughersteller übergehen. Eine sichere automatische Fahrzeugführung im gemischten Verkehr ist gegenwärtig und auf absehbare Zeit nicht möglich.

Die geschätzten Kosten für die Fahrzeugausstattung und die Infrastruktur bei automatischer Fahrt auf abgesperrten Strecken übersteigen mit ca. 6000 € gegenwärtig bei weitem die auf dem freien Markt erzielbaren Erträge (**Bild 8-20**).

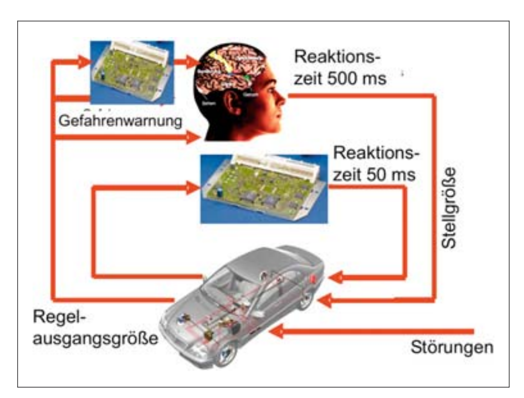


Bild 8-18: Regelkreis Fahrer–Fahrzeug–Umfeld mit artifiziellem Copilot [14]

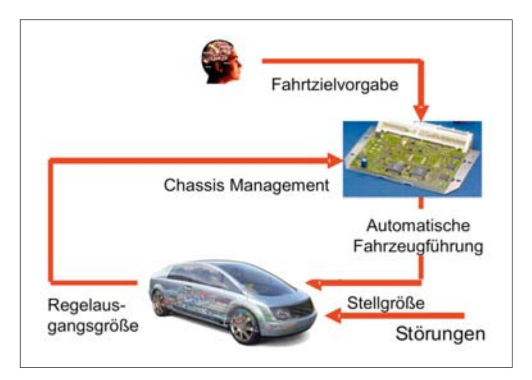


Bild 8-19: Regelkreis beim autonomen Fahren [14]

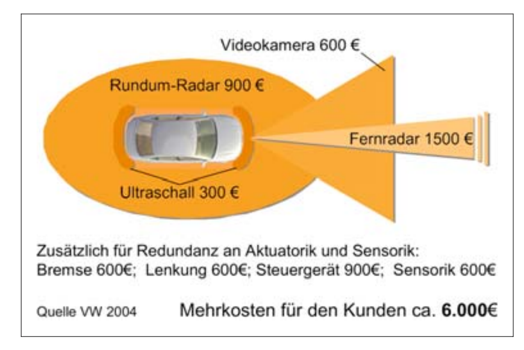


Bild 8-20: Geschätzte Mehrkosten für den Endkunden beim autonomen Fahren [14]

8.8 Zukunftsszenarien für das Auto und sein Fahrwerk

Wie sieht das Fahrzeug der Zukunft aus?Wie sieht das Fahrwerk der Zukunft aus?Passen heutige Produkte und Produktentwicklungen zu den Kundenanforderungen von morgen?Diese Fragen stehen am Anfang jeder Produktentwicklung und sind Grundlage von Produktstrategien aller Unternehmen der Automobilindustrie. Derjenige, der zur richtigen Zeit das passende Produkt auf den Markt bringt, kann sich einen entscheidenden Wettbewerbsvorteil sichern. Deshalb lohnt es sich im Vorfeld einer Entwicklung, Markttrends der Zukunft zu ermitteln, selbst wenn man die Zukunft nicht genau vorhersagen kann.

Eine Vielzahl von Methoden steht den Markt- und Trendforschern zur Verfügung um Zukunftstrends zu ermitteln. Nachfolgend ist eine Auswahl an Verfahren dargestellt [15]

Trends aus der Vergangenheit

Die Entwicklung vorangegangener Jahre wird ermittelt und in die Zukunft extrapoliert. So erhält man Hinweise, wie zukünftige Fahrzeuge aussehen könn-

ten. Beispielsweise kann man so feststellen, dass Motoren immer stärker und Fahrzeuge immer schwerer werden. Neu aufkommende Trends, z.B. das Auftreten einer neuen Technologie oder neuer Rahmenbedingungen, können aber so nicht vorausgesehen werden. Die Trends aus der Vergangenheit basieren auf Kundenbedürfnisse, die sich relativ langsam verändern. Man kann vielleicht von Grundkundenbedürfnissen sprechen, die die Industrie mit ihren Produkten relativ einfach abdecken kann. Daher werden solche Grundkundenbedürfnisse auch gerne gezielt mit neuen Produkten verstärkt und gefördert.

Trends aus der Gegenwart

Durch Kundenbefragungen und der Beobachtung veränderter Rahmenbedingungen wie z.B. das Eintreten neuer gesetzlicher Regelungen können neue Trends ermittelt werden, die Einfluss auf das Fahrzeug und seiner Komponenten haben können. Beispielsweise haben Diskussionen um Feinstaubbelastungen in Städten neuen Technologien wie Russpartikelfiltern Auftrieb verliehen. Der Ausstoß von CO_2 und die damit verbundene Klimaveränderung beschleunigt die Einführung sparsamer Fahrzeuge. Solche Trends entstehen relativ kurzfristig und sind schwer einzuschätzen: handelt es sich nur um einen kurzzeitigen Trend, einen so genannten „Hype“, oder ist ein neuer, ein so genannter „Mega-Trend“ im Anmarsch.

Trends der Zukunft

Kundenanforderungen und Trends, deren Beginn in der Zukunft liegen, kann man heute nicht erkennen. Dennoch ist es sehr reizvoll, diese Trends frühzeitig zu spüren und in den Entwicklungsprozess eines Fahrzeugs einzuplanen. Von der Konzeptphase eines neuen Fahrzeugs bis zur Serieneinführung vergehen bis zu sieben Jahre. Danach wird das Fahrzeug etwa sieben Jahre lang produziert. Anschließend sollen die Fahrzeuge noch mindestens zehn Jahre benutzt werden und möglichst einen hohen Wiederverkaufswert erzielen. Es muss also bereits zu Beginn der Konzeptphase ein Zeitraum von etwa 25 Jahren überblickt werden. Hierzu müssen die oben genannten Methoden der Trendanalyse ergänzt werden, was im Weiteren näher erläutert wird.

Zukunft ist grundsätzlich nicht vorhersagbar!Zukunft hängt vielmehr kausal mit der Gegenwart zusammen: Angenommen wir wissen genau, wie die Zukunft aussehen wird, so würden wir unser Verhalten heute schon verändern. Als Folge würde sich die Zukunft anders gestalten als zuvor vorhergesagt. Obwohl die Zukunft nicht vorhersagbar ist, ist es wichtig, über die Zukunft möglichst genau Bescheid zu wissen. Man muss sich also mit der Zukunft beschäftigen, wenn man sie auch nicht vorhersagen kann (**Bild 8-21**).

Die Szenarioanalyse bietet einen guten Ansatz zur Erforschung der Zukunft. Die Zukunft wird hierbei nicht vorhergesagt. Vielmehr wird in mehreren Extremszenarien ein Raum an möglichen Zukunftsvisionen aufgespannt. Man geht dann davon aus, dass die tatsächliche Zukunft innerhalb dieses Zukunftsraumes eintritt (**Bild 8-22**).

In so genannten konsistenten Zukunftsbildern werden mögliche Zukunftsszenarien beschrieben, die in sich schlüssig sind. Im Gegensatz zur Aneinanderreihung von unabhängigen Aussagen, Thesen und Prognosen über die Zukunft wird bei der Szenarioanalyse eine Konsistenzprüfung durchgeführt.

Einzelthesen werden nur dann zu einem Zukunftsbild zusammengesetzt, wenn diese in einem logischen Einklang miteinander stehen. So entstehen mehrere konsistente, also in sich schlüssige Zukunftsbilder, die sich jedoch in Ihrer Ausprägung widersprechen. Diese möglichen Zukunftsvisionen spannen dann einen Raum auf, der Hinweise auf die tatsächlich eintretende Zukunft gibt. Entsprechen die Produkte eines Konzerns den Kundenanforderungen in allen Zukunftsbildern, so ist die Produktstrategie optimal ausgelegt.

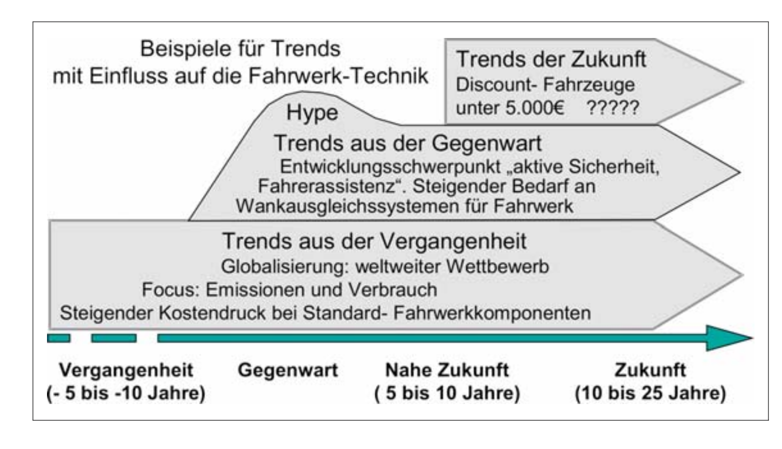


Bild 8-21:
Trendüberlagerung:Trends aus Extrapolation der Vergangenheit, neue Trends aus der Gegenwart und Zukunftstrends

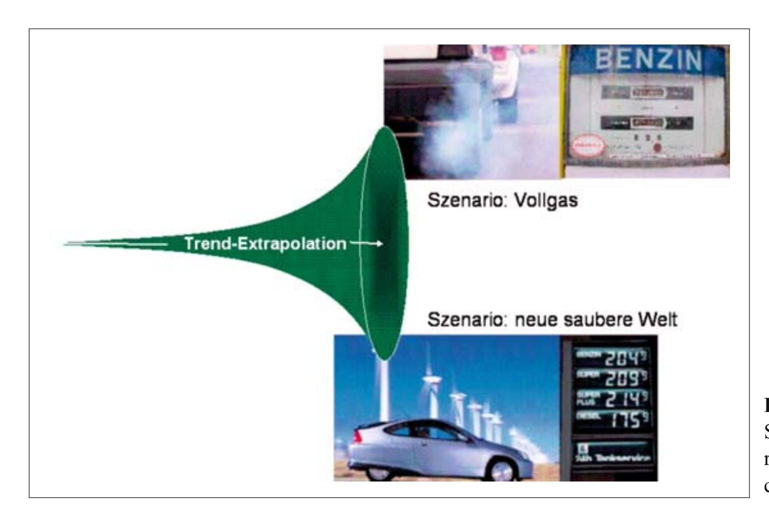


Bild 8-22:
Szenarioanalyse:Extremszenarien spannen den Raum möglicher Zukunftsvisionen auf

Im Einzelnen werden bei der Szenarioanalyse folgende Schritte durchlaufen:

- Festlegung eines Betrachtungsfelds und eines Zeitfensters in der Zukunft, z.B.: Wie sieht das Pkw-Fahrwerk in Europa im Jahre 2025 aus?
- Bestimmung der Einflussfaktoren auf die Gestaltung des Fahrwerks, z.B. Werkstoffe, Gesetze für Sicherheit aber auch Treibstoffpreise, gesellschaftliche Rahmenbedingungen und vieles mehr.
- Bestimmung möglicher Ausprägungen der Einflussfaktoren. Beispielsweise können Treibstoffpreise extrem oder nur moderat steigen. Gesellschaftlich kann es zu allgemein steigendem Wohlstand unter Beteiligung einer großen Bevölkerungsschicht kommen, oder zum Ausbilden einer Zwei-Klassen-Gesellschaft mit einer relativ großen Oberklasse, einer kleinen Mittelschicht und einer großen Anzahl an Menschen mit niedrigem Einkommen und geringer Kaufkraft.
- Konsistenzmatrix: in diesem entscheidenden Schritt werden die Einflussfaktoren untereinander bewertet. Stark steigende Kraftstoffpreise passen zum Beispiel gut zum Auftreten neuer Technologien und Werkstoffe, da in solch einem Fall bestimmt verstärkt an Leichtbau-Materialen geforscht wird. Auf der anderen Seite passen neue Technologien und sinkender Lebensstandard nicht zusammen. Jeder Einflussfaktor mit seinen Ausprägungen wird so auf Konsistenz zu allen anderen Einflussfaktoren bewertet. Die so entstehende Konsistenz-Matrix kann dann ausgewertet werden, indem Konstellationen an Einflussfaktoren und deren Ausprägungen errechnet werden, die in der Summe die höchste Konsistenz ergeben.
- Szenarien ausarbeiten: Die aus der Konsistenzmatrix berechneten Konstellationen aus konsistenten Einflussfaktoren und Ausprägungen werden über eine Geschichte, eine Präsentation oder Filme ausgearbeitet. Wichtig ist, dass der Zuhörer sich in die Szenarienwelt hineinfühlen kann. Typischerweise erhält man 2 bis 3 Szenarien, die den Raum der „möglichen Zukünfte“ aufspannen.

Nachdem man nun den Raum der möglichen Zukunftsvisionen aufgespannt hat, kann man die konkreten Ableitungen für ein Produkt- oder Technologiefeld vornehmen. Im Idealfall findet man Produktlösungen, die für den ganzen Raum möglicher „Zukünfte“ geeignet sind.

Im Falle der Pkw-Fahrwerk-Studie für das Jahr 2025 der ZF Friedrichshafen AG haben sich drei Szenarien ergeben, die im Folgenden kurz zusammengefasst werden:

- **Konvergenz:** Die Gesellschaft, bestehend aus einer breiter Mittelschicht mit steigendem Wohlstand leistet sich eine Umweltgesetzgebung, die neue Technologie forciert, jedoch auch für den Ausbau öffentlicher Verkehrsmittel sorgt, so dass die Umwelt möglichst wenig belastet wird. Fahrzeuge müssen sauber und auch sicher sein. Leichtbau-Technologien für geringen Treibstoffverbrauch werden ebenso begünstigt wie aktive Systeme für eine Erhöhung der Sicherheit.
- **Kontraste:** In der Gesellschaft entwickelt sich eine breitere Oberschicht mit stark steigender Kaufkraft. Die breite, kaufkraftstarke Mitte des ersten Szenarios existiert nicht, dafür jedoch eine breite Gesellschaftsschicht mit geringer Kaufkraft. Diese Gesellschaft möchte sich keine Umweltpolitik mit rigiden Vorschriften leisten. Aufgrund sinkender Staatseinnahmen kann auch der öffentliche Verkehrssektor nicht ausgebaut werden. Die Stärkung der unteren und oberen Gesellschaftsschichten spiegelt sich in den Fahrzeugen wieder. Einerseits werden einfache, billige Fahrzeuge mit einfachsten

Fahrwerken nachgefragt. Am anderen Ende ist ein steigender Bedarf an Premiumfahrzeugen mit aktiven Fahrwerksystemen zur Steigerung des Komforts (die Straßen werden schlechter) und der Agilität.

- ♦ **Umbruch:** Umweltkatastrophen erfordern zwingend eine Kursänderung in der Gesetzgebung und der Mobilität. Die Gesellschaft konzentriert sich auf das Leben in der Stadt. Individualverkehr geht stark zurück. Nur noch kleine und sehr umweltfreundliche Fahrzeuge können gefahren werden. Ein ideales Fahrwerk ist daher einfach, billig und leicht. Komfort oder Agilität spielen keine Rolle.

Das Fahrwerk der Zukunft können wir heute also nicht genau festlegen. Beobachtet man jedoch die gewählten Einflussfaktoren und gleicht aktuelle gesellschaftliche Trends und veränderte Rahmenbedingungen mit den Szenarien ab, so könnte das Szenario „Kontraste“ am Ende der aktuellen Entwicklung stehen. Für das Fahrwerk hätte das eine Zweiteilung zur Folge: Einerseits werden Innovationen für ein wachsendes Premiumsegment gefragt, andererseits bestimmen Kostenfokus und Vereinfachung die Fahrwerksentwicklung für die wachsende Anzahl von Kunden mit geringer Kaufkraft.

8.9 Ausblick

Alle Untersuchungen zeigen, dass in Europa, Nordamerika, Japan und sogar in Südkorea der Automobilmarkt bereits gesättigt ist und auch die Bevölkerung in diesen Ländern nicht mehr wächst. Die Wachstumsmärkte für den Autoabsatz der Zukunft sind China, Indien, Russland, Südasien und vielleicht auch Südamerika. In diesen Märkten werden aber keine teure sondern einfache, geräumige, robuste Autos für weniger als 7000.– € benötigt [16]. Bis 2015 wird folgendes Wachstum für Pkw incl. Pick-Ups geschätzt [17]: EU 3% (Absatz 15,5 Mio.), Japan 10% (5,4 Mio.), Nafta 12% (21,6 Mio.), restl. Europa 38% (6,7 Mio.), Süd-Ostasien 61% (2,8 Mio.), Lateinamerika 71% (4,4 Mio.) Pazifik 81% (6,7 Mio.), China 93% (6,4 Mio.) (**Bild 8-23**).

Die Prognosen von Britisch Petroleum (BP) geht davon aus, dass der Fahrzeugbestand weltweit von derzeit 800 Millionen bis zum Jahr 2050 auf 2 Milliarden ansteigen wird [16]. Zugleich wird die Energienachfrage bis 2030 um 60% zunehmen. Dabei sind die Reserven der fossilen Energie auf 40 bis 50 Jahre geschätzt. Die fossilen Brennstoffe werden ab 2025 die wachsende Nachfrage nicht mehr abdecken können und deren Preis wird bis dahin stetig steigen. Mit synthetischen Brennstoffen aus nachwachsenden Stoffen zusammen mit Brennstoffzelle, Wasserstoff und Hybridantrieben wird versucht, die Lücke zu schließen. Der Kraftstoffanteil an den Gesamtkosten des Autos wird deshalb stark wachsen. Dies wird dann wiederum die Bereitschaft der Autokäufer, mehr für das Auto zu bezahlen, stark begrenzen; zuerst wird auf das Zubehör verzichtet und dann auf ein billigeres Modell umgestiegen.

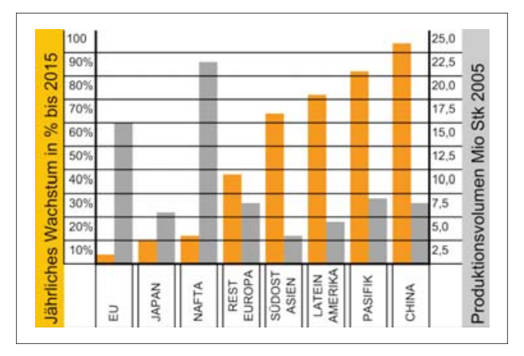


Bild 8-23: Entwicklung des Pkw-Marktes in den Weltregionen bis 2015

Das globale Kundenverhalten wird sich ändern. Nach der Prognose von A.C. Nielsen in 2003 [17] wird die Bedeutung des Mittelpreissegments stark schrumpfen; derzeit von 34% auf 10% im Jahr 2010. Dafür wird das Hochpreissegment von 35 auf 40% und das Niedrigpreissegment von 31 auf 45% steigen. Nach 2010, durch o.g. Wachstum in Asien, wird sich die Tendenz noch verstärken, nach 2016 werden 2/3 des Autos zum Niedrigpreissegment gehören und das Mittelpreissegment wird keine Beutung mehr haben. Diese Tendenz ist heute schon in Deutschland festzustellen: nach einer Studie des Prognoseinstituts B&D-Forcast wird der Marktanteil der Autos unter 10 000.- € schon in 2006 von 4,2 auf 4,7% steigen [18]. Seit 2003 ist der Marktanteil des mittleren Preissegments von 32 auf 28% gefallen. Gleichzeitig steigt der Anteil von Autos über 18 T€ von 64 auf 67%

All diese Prognosen zeigen, dass die Mobilität durch Pkw zwar in der Zukunft weiter steigen wird, der Großteil dieser Autos wird jedoch weniger kosten als heute. Wegen der steigenden Kraftstoffkosten und strenger werdenden Emissionsvorschriften müssen die Autos deutlich weniger verbrauchen. Das größte Potenzial liegt hier an dem noch zu niedrigen Wirkungsgrad der Verbrennungsmotoren.

Der Beitrag des Fahrwerks zur Verbrauchsreduzierung wird durch die Senkung des Gewichtes und des Rollwiderstandes realisiert. Die Reifen mit Silan-Additiven können schon heute den Verbrauch bis zu 8% reduzieren [19] und das Gewicht des Fahrwerks lässt sich schon heute durch Einsatz eines intelligenten Materialmixes und durch Einsatz von CAx-Methoden bis zu 20% reduzieren [20].

Entsprechend der dualen Preissegmentierung wird es auch nur noch zwei unterschiedliche Fahrwerke geben.

Das Fahrwerk des unteren Preissegments muss einfacher, leichter, robuster und preiswerter werden. Der Kostendruck wird die Hersteller dazu bewegen, mehr und mehr Standardfahrwerke zu benutzen, die mit deutlich weniger Einzelteilen in großen Stückzahlen mit Niedriglöhnen gefertigt werden und nicht nur modell- sondern auch brandübergreifend einsetzbar sind. Dementsprechend wird das Fahrwerk in diesem Preissegment als Verkaufsargument keine Rolle mehr spielen. Als kostengünstigste Konzepte gelten McPherson vorn und Verbundlenker hinten. Ein zeitgemäßer Sicherheitsstandard bei Fahrzeuggeschwindigkeiten bis 160 km/h. wird erwartet, jedoch keine übertriebenen Anforderungen an den Komfort gestellt, um die Herstellkosten niedrig zu halten.
Ganz anders wird es im Hochpreissegment sein. Das Fahrwerk wird wegen seines großen Einflusses auf Komfort, Sicherheit und Fahrspaß noch deutlicher als Verkaufsargument benutzt und daher technologisch weiter auf High-tech-Niveau entwickelt. Die Mehrlenkeraufhängungen werden in diesem Segment sowohl vorn als hinten den Standardachse bilden und die aktiven Fahrwerksysteme werden hier voll zur Geltung kommen.
Das Mittelpreissegment wird, wie beschrieben, kaum noch eine Rolle spielen und damit wird es keinen Bedarf an Fahrwerke zwischen diesen beiden Kategorien geben.
Mobilität wird auch in den nächsten 50 Jahren hauptsächlich mit Fahrzeugen mit Fahrbahnkontakt (auf Räder) stattfinden und daher wird das Fahrwerk auch in den nächsten 50 Jahren aktuell bleiben, unabhängig davon, was für eine Energie- bzw. Antriebsart es fortbewegt.
Den größten Änderungen an der Fahrwerktechnik der Zukunft werden durch die Technologien Hybrid und elektronische Fahrwerkregelung – aktive und X-by-wire-Systeme – herbeigeführt. Diese können das Fahrwerk soweit beeinflussen, dass die zukünftigen Fahrwerke ganz anders aussehen müssen als die heutigen. Ein Vorbote hierzu zeigt die Studie von Siemens VDO (s. **Bild 4-79**). In den letzten 5 Jahren sind auch andere, ähnliche Studien bekannt geworden, die beweisen, dass die Visionen in den Bildern **4-78**, **8-8**, **8-11** oder **8-15** nicht zu sehr utopisch sind.

Literatur

[1] Institut für Fahrzeugtechnik der TU München: Interner Bericht. TU München, 2005

[2] *Gordon, T.; Howell, M.; Brandao, Fl.*: Integrated Control Methodologies for Road Vehicles. In: Vehicle System Dynamics 40 (2003), Nr. 1–3, S. 157–190

[3] *Tanaka, H.; Inoue, H.; Iwata, H.*: Development of a Vehicle Integrated Control System. Proceedings of the XXIV FISITA Congress. London, 1992. S. 63–72,

[4] ZF Friedrichshafen: Interne Präsentation von Prof. Christ. Friedrichshafen, 1994

[5] *Hlubek, B.; Hobein, D.*: Intelligente Sensorik – Basis für perfekte Performance. In: ATZ, 102 (2000), Nr. 12, S. 1118–1123

[6] VDA Bericht 2005

[7] ATZ-Sonderheft Mercedes S Klasse

[8] *Jungmann, T.*: Hi-Fi-Spezialist Bose entwickelt aktives Fahrwerk. www.all4engineers.com, Top-Stories

[9] *Pecht, N.* (Hrsg.): Fahrwerktechnik für PKW – Grundlagen, Konzepte, Prozesse und Trends. Landsberg: Verlag Moderne Industrie, 2004

[10] *Bielefeld, M.; Bieler, N.*: Modulare Hybrid-Antriebssysteme. In: ATZ 107 (2005), Nr. 9, S. 738–745

[11] *Truett, R.*: Automakers see promise in placing power at wheels. In: Automotive News, 78 (2004) 3/8, Issue 6083

[12] Advancements in electric and hybrid electric vehicle technology. SAE SP-1023. Warrendale: Society of Automotive Engineers, 1994

[13] Firmen Prospekt DANA Corporation CPB-082005 Maumee-OH

[14] *Heißing, B.*: Wer fährt unsere Fahrzeuge in der Zukunft – Mensch oder Computer. TU München, 2005

[15] ZF Friedrichshafen: Interner Zukunftstudie für Fahrwerk und Antrieb. Friedrichshafen, 2005

[16] *Goeudevert, D.*: Die Automobilindustrie ist nicht innovativ. VDI-Nachrichten, Ausgabe 24.3.2006. Düsseldorf, 2006

[17] *Hubbert, J.*: Die Autoindustrie in schwerem Gelände. 7. Grazer Allradkongress, 2./3. Februar 2006. S. 20/1-7

[18] Autotrends 2006. In: Automobilwirtschaft März 2006, S 4, München: Krafthand Verlag, 2006

[19] *Joop, K.*: Neuartige Reifenkomponeneten helfen Kraftstoff sparen. VDI-Nachrichten, Ausgabe 28.04.2006. Düsseldorf, 2006

[20] *Breass, Seiffert*: Kraftfahrzeughandbuch. Wiesbaden: Vieweg Verlag, 2001